

TUGAS AKHIR - TE 141599

*SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW
DENGAN DYNAMIC THERMAL LINE RATING*

Nurdin Sugiantoro

NRP 07111340000082

Dosen Pembimbing

Dr. Rony Seto Wibowo, ST.,MT.

Vita Lystianingrum B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D.



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

***SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW
DENGAN DYNAMIC THERMAL LINE RATING***

Nurdin Sugiantoro
NRP 07111340000082

Dosen Pembimbing
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Vita Lystianingrum B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE141599

SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW WITH DYNAMIC THERMAL LINE RATING

Nurdin Sugiantoro
NRP 07111340000082

Supervisor
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Vita Lystianingrum B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “***Security Constrained Optimal Power Flow dengan Dynamic Thermal Line Rating***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap dalam daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 21 Desember 2017

Nurdin Sugiantoro

(07111340000082)

**SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW DENGAN
DYNAMIC THERMAL LINE RATING**

TUGAS AKHIR

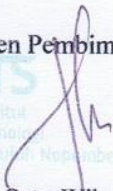
Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada


Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T
NIP. 1974 11 29 2000 12 1001


Vita L. B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D.
NIP. 1982 08 29 2006 04 2001



SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW DENGAN DYNAMIC THERMAL LINE RATING

Nama Mahasiswa : Nurdin Sugiantoro
NRP : 07111340000082
Dosen Pembimbing I : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP : 197411292000121001
Dosen Pembimbing II : Vita L. B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D.
NIP : 198208292006042001

ABSTRAK

Operasi sistem tenaga listrik yang baik menjadi hal penting untuk diperhatikan guna memenuhi kebutuhan terhadap energi listrik yang terus meningkat. *Optimal power flow* dapat digunakan untuk mencari solusi optimal operasi sistem tenaga listrik dengan memperhatikan aliran daya dan batasan – batasan sistem. Namun *OPF* konvensional tidak bisa digunakan untuk perhitungan dengan beban yang dinamis dan juga tidak mempertimbangkan batasan keamanan sistem saat terjadi kontingensi. *Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF)* merupakan pengembangan dari *OPF* dengan mempertimbangkan keamanan sistem dan batasan *ramprate*. Pada penelitian ini perhitungan *SCOPF* arus bolak – balik dilakukan dengan metode *sequential quadratic programming*. Berdasarkan hasil simulasi, terbukti bahwa metode *sequential quadratic programming* mampu untuk menyelesaikan permasalahan *AC-SCOPF* tanpa melanggar batasan *ramprate*, kapasitas saluran saat kontingensi, dan batasan – batasan lainnya. Total biaya pembangkitan dengan pertimbangan kontingensi menghasilkan biaya yang sedikit lebih mahal hingga 5%, karena penyesuaian pembangkitan untuk memastikan *re-dispatch* agar tidak melanggar batasan *ramprate* antara kondisi normal dengan kontingensi dan batasan kapasitas saluran. Dengan menggunakan rating saluran yang dinamis berdasarkan kondisi cuaca yang berubah – ubah, total biaya pembangkitan menjadi lebih murah terutama dengan perhitungan yang mempertimbangkan batasan keamanan sistem.

Kata kunci: *ACOPF, Security Constraint, Sequential Quadratic Programming, Dynamic Line rating*

Halaman ini sengaja dikosongkan

SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW WITH DYNAMIC THERMAL LINE RATING

Nama Mahasiswa	: Nurdin Sugiantoro
NRP	: 07111340000082
Supervisor I	: Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP	: 197411292000121001
Supervisor II	: Vita L. B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D.
NIP	: 198208292006042001

ABSTRACT

Operation of electric power system becomes an important thing to note in order to meet the need for increasing electrical energy. Optimal power flow can be used to find the optimal solution of electric power system operation taking into account power flow and system constraints. However, conventional OPF can not be used for calculations with dynamic load and also does not consider the constraints of system security when contingency occurs. Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF) is a development of OPF taking into account system security and ramprate constraint. In this study calculation of alternating current SCOPF is done by sequential quadratic programming method. Based on the simulation results, it is proven that sequential quadratic programming method is able to solve AC-SCOPF problems without violating the ramprate constraint, branch capacity during contingency, and other constraints. Total generating costs with contingency considerations result in slightly more expensive costs to 5%, due to generated adjustments to ensure re-dispatch to avoid violating the ramp rate constraint between normal with contingency conditions and branch capacity constraints. By using dynamic line rating based on changing weather conditions, the total cost of generation is cheaper especially with calculations that take into account system security constraint.

Index terms: ACOPF, Security Constraint, Sequential Quadratic Programming, Dynamic Line rating

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala cinta dan kasih sayang yang telah diberikan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian ini sebagai tugas akhir untuk menyelesaikan jenjang studi S1 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa Teknik Elektro.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini penulis mengucapkan terimakasih atas segala bantuan, bimbingan, dan dukungan yang telah diberikan, kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang tanpa bantuan-Nya penulis tidak mungkin bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Ayah, Ibu, Mbak Hermin, Mas Agus, Mbak Sri, Mas Agung, Mbak Desi, dan Mas Herman atas segala doa, dukungan, nasehat, dan segalanya.
3. Dr. Rony Seto Wibowo ST., MT., selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir dan Vita L. B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir yang telah memberikan arahan, saran serta bimbingan selama pengerjaan tugas akhir dan selama perkuliahan di Teknik Elektro.
4. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan ilmu dan inspirasi selama perkuliahan.
5. Bagus, Mbak Santi, Mas Fajar, Aden, Mas Hans dan teman – teman di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga.
6. Teman – teman E53 atas segala dukungan dan ceritanya.
7. Budi, Eka, Sipit, dan teman – teman Argabayu Nganjuk atas segala motivasinya.
8. Fahmi, Arief, Deni dan teman teman di kontrakan BME yang sering menemani dan membantu penulis.
9. Mbak Trisna, Mas Khalil, Mas Iwan dan teman – teman mahasiswa S2 yang sering membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini..
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, dengan tanpa mengurangi rasa terima kasih penulis.

Dalam menyusun tugas akhir ini, penulis menyadari masih banyak kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik, saran maupun diskusi sangat diharapkan penulis untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 21 Desember 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SINGKATAN	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metode Penelitian	3
1.6 Sistematika Laporan	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN DYNAMIC LINE RATING MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN SISTEM	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Keamanan Sistem Tenaga	8
2.3 Optimal Power Flow	9
2.4 Persamaan Matematis Permasalahan Optimal Power Flow Arus Bolak-balik	9
2.5 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)	11
2.6 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) dengan batas keamanan system	12
2.7 Dynamic Line Rating dengan Heat Balance Equation	14
2.8 Optimal Power Flow Mempertimbangkan Dynamic Line Rating	16
BAB 3 PENERAPAN SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN SISTEM DENGAN RATING SALURAN DINAMIS	17
3.1 Algoritma	17
3.2 Sequential Quadratic Programming pada Matlab	19

3.3	Penerapan Sequential Quadratic Programming pada Aliran Daya Optimal dengan Batas Keamanan Sistem	21
3.3.1	Inisialisasi Permasalahan DOPF	21
3.3.2	AC-DOPF Pada Sequential Quadratic Programming ..	23
3.3.3	Dynamic Line Rating	31
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS.....		35
4.1	Analisis Kontingensi.....	35
4.1.1	Analisis Kontingensi Sistem 9 bus	35
4.1.2	Analisis Kontingensi Sistem 30 bus	36
4.2	Simulasi Sistem 9 Bus IEEE.....	37
4.2.1	Pengujian Tahap 1	38
4.2.2	Pengujian Tahap 2	40
4.2.3	Pengujian Tahap 3	42
4.2.4	Pengujian Tahap 4	46
4.3	Pengujian Sistem 30 Bus	49
4.3.1	Hasil Simulasi Sistem 30 Bus.....	50
4.3.2	Analisa Simulasi Sistem 30 Bus	52
BAB 5 PENUTUP		53
DAFTAR PUSTAKA		55
LAMPIRAN		57
RIWAYAT HIDUP PENULIS		63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> alur sistem	18
Gambar 4.1 Sistem IEEE 9 Bus.....	36
Gambar 4.2 Biaya Pembangkitan Per Jam	43
Gambar 4.3 Biaya Pembangkitan Pengujian Tahap 4	47
Gambar 4.4 Kapasitas Saluran bus1 ke 4, Statis dan Dinamis	48
Gambar 4.5 Kapasitas Saluran bus 8 ke 2, Statis dan Dinamis	48
Gambar 4.6 Sistem IEEE 30 Bus.....	50
Gambar 4.7 Kapasitas saluran bus 1 ke bus 2 case 30 bus	51
Gambar 4.8 Biaya Pembangkitan Sistem 30 Bus	51

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Daftar Dampak Kontingensi sistem 9 bus IEEE.....	36
Tabel 4.2 Daftar Dampak Kontingensi Sistem 30 bus IEEE.....	37
Tabel 4.3 Data Pembangkit Sistem Modifikasi IEEE 9 bus	38
Tabel 4.4 Data Saluran Sistem Modifikasi IEEE 9 bus	38
Tabel 4.5 Data Beban Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus	38
Tabel 4.6 Data 2 Level Beban Untuk Pengujian Tahap 1	39
Tabel 4.7 Hasil sudut bus, daya aktif dan reaktif keluaran generator dan biaya pembangkitan pada simulasi tahap 1	40
Tabel 4.8 Profil beban pengujian tahap 2	41
Tabel 4.9 Biaya total pembangkitan	41
Tabel 4.10 Daya pembangkitan tanpa batasan ramprate	41
Tabel 4.11 Daya pembangkitan dengan batasan <i>ramp rate</i>	41
Tabel 4.12 Perubahan daya pembangkitan tanpa batasan <i>ramp rate</i>	42
Tabel 4.13 Perubahan daya pembangkitan dengan batasan <i>ramp rate</i> .	42
Tabel 4.14 Profil beban pengujian tahap 3	43
Tabel 4.15 Biaya total pembangkitan	43
Tabel 4.16 Daya pembangkitan kondisi normal	43
Tabel 4.17 Daya pembangkitan kondisi kontingensi.....	44
Tabel 4.18 Perubahan daya pembangkitan	44
Tabel 4.19 Aliran daya saluran pada jam ke-4 kondisi normal	44
Tabel 4.20 Aliran daya saluran pada jam ke-4 kondisi kontingensi	45
Tabel 4.21 Perhitungan rating saluran dinamis pada saluran bus 1 ke bus 4 dari case IEEE 9 bus.....	46
Tabel 4.22 Total biaya pembangkitan AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis.	47
Tabel 4.23 Kapasitas saluran transmisi	47
Tabel 4.24 Perhitungan rating saluran dinamis pada saluran bus 1 ke bus 2 dari <i>case</i> 30 bus	49
Tabel 4.25 Profil beban pengujian sistem 30 bus	49
Tabel 4.26 Total biaya pembangkitan AC-DOPF sistem 30 bus	51

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	Definisi
OPF	Optimal Power Flow
ACOPF	Alternating Current Optimal Power Flow
DCOPF	Direct Current Optimal Power Flow
DOPF	Dynamic Optimal Power Flow
SCOPF	Security Constraint Optimal Power Flow
AC-DOPF	Alternating Current Dynamic Optimal Power Flow
AC-SCOPF	Alternating Current Security Constraint Optimal Power Flow
SQP	Sequential Quadratic Programming
SLR	Static Line Rating
DLR	Dynamic Line Rating

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Operasi sistem tenaga listrik yang baik menjadi hal penting untuk diperhatikan guna memenuhi banyaknya kebutuhan masyarakat terhadap energi listrik yang terus meningkat. Terdapat tiga kriteria yang harus diperhatikan untuk mendapatkan operasi sistem tenaga listrik yang baik. Tiga kriteria tersebut adalah *security* (keamanan), *economy* (ekonomi) dan *quality* (kualitas). *Security* yaitu kemampuan sistem untuk menghadapi suatu kendala seperti gangguan tanpa mengakibatkan pemadaman. *Economy* yaitu kemampuan sistem untuk memperoleh biaya yang minimum dengan tetap memperhatikan keandalan dan kualitasnya. *Quality* yaitu kemampuan sistem untuk menyediakan pasokan energi yang baik sesuai dengan batasan operasi seperti tegangan yang sesuai standar.

Optimalisasi sistem tenaga telah berkembang baik dari sisi teori optimalisasi dan teknik komputasi yang efisien. *Optimal power flow* merupakan gabungan dari dua study yaitu *power flow* dan *economic dispatch*. *Economic dispatch* menggambarkan berbagai formulasi untuk menentukan biaya pembangkitan termurah untuk melayani beban tertentu. Namun formulasi ini terlalu menyederhanakan dengan mengabaikan batasan aliran daya[1]. *Optimal power flow* mencari solusi optimal dari fungsi obyektif dengan batasan aliran daya dan batasan operasional lainnya seperti minimum dan maximum output generator, kapasitas saluran transmisi dan lainnya. OPF konvensional tidak memperhatikan batasan *ramp rate* pembangkit sehingga pada beban yang dinamis terdapat pembangkitan yang melebihi batasan operasi. Selain hal tersebut, *OPF* konvensional juga belum bisa mengatasi gangguan pada sistem seperti hubung singkat atau terjadinya kontingensi saluran. Untuk itu diperlukan adanya pengembangan dari *OPF* yang memperhitungkan kontingensi sehingga ketika terjadi gangguan, keandalan sistem tetap terjaga dan dapat mengalirkan daya listrik yang sesuai serta tidak melanggar batasan-batasan yang ada.

Kapasitas transfer daya saluran transmisi merupakan *constraint* penting dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga. *Constraint* ini memiliki peran penting dalam pengelolaan sistem tenaga yang aman dan ekonomis. Secara tradisional, rating kapasitas saluran didefinisikan dengan nilai statis atau tetap dengan asumsi kondisi cuaca konservatif.

Rating statis jarang disesuaikan, sehingga biasanya berdasarkan kondisi skenario terburuk yaitu saat kecepatan angin rendah, suhu lingkungan tinggi dan radiasi matahari yang tinggi) [2].

Dengan memantau keadaan termal saluran transmisi dan mempertimbangkan kondisi meteorologi, maka rating saluran yang disesuaikan secara dinamis memungkinkan kapasitas transmisi yang lebih tinggi[3]. Tidak seperti rating statis, rating dinamis dihitung secara *real time* berdasarkan kondisi operasi aktual saluran transmisi pada saat-saat tertentu, bukan pada asumsi tetap. Penerapan *dynamic line rating* pada saluran transmisi berpotensi meningkatkan keamanan sistem dengan tingkat ekonomi yang lebih baik jika dibandingkan dengan *static line rating* [4].

Security Constraint Optimal Power Flow dengan *Dynamic Line Rating* merupakan pengembangan dari *OPF* konvensional yang memperhitungkan batasan *ramprate* pembangkit dan juga memperhitungkan kontingensi serta menggunakan rating saluran yang dinamis. Penambahan batasan *ramprate* dan perhitungan kontingensi akan meningkatkan tingkat keamanan sistem sedangkan penggunaan rating saluran yang dinamis akan meminimalkan biaya operasi terutama saat terjadi kontingensi.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang ingin diselesaikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana membuat program pembebanan ekonomis pembangkit *security constrained optimal power flow* arus bolak-balik dengan rating saluran yang dinamis, batasan *ramprate* dan memperhitungkan kontingensi.
2. Bagaimana pembebanan ekonomis pembangkit dengan memperhitungkan *ramprate* dan kontingensi.
3. Bagaimana pembebanan ekonomis pembangkit dengan rating saluran yang dinamis dan memperhitungkan kontingensi.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat program pembebanan ekonomis pembangkit *security constrained optimal power flow* arus bolak-balik

dengan rating saluran yang dinamis, batasan *ramprate* dan memperhitungkan kontingensi.

2. Menentukan pembebanan ekonomis pembangkit dengan memperhitungkan kontingensi dan batasan *ramprate*.
3. Menentukan pembebanan ekonomis pembangkit dengan rating saluran yang dinamis dan memperhitungkan kontingensi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Semua pembangkit diasumsikan selalu beroperasi dalam keadaan menyala.
2. *Ramp up* pembangkit sama dengan *ramp down* pembangkit.
3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *Matlab Matpower*.
4. Metode yang dipakai untuk menyelesaikan permasalahan adalah *sequential quadratic programming*.
5. Semua saluran dalam sistem diasumsikan *double circuit*.
6. Efisiensi masing-masing pembangkit dianggap 100%.
7. Data kondisi meteorologi berdasarkan sumber referensi [5].
8. Kondisi meteorologi pada setiap saluran transmisi sama.
9. Rating saluran proporsional terhadap *dynamic line rating*.
10. Sistem yang dipakai adalah sistem IEEE 9 bus dan 30 bus.

1.5 Metode Penelitian

Pada penelitian ini akan dilakukan penelitian mengenai *security constrained optimal power flow (SCOPF)* dengan memperhatikan batasan *ramp rate* generator, batasan saluran dan rating saluran yang dinamis. *Sequential Quadratic Programming* digunakan untuk menyelesaikan perhitungan *SCOPF*. Perhitungan optimal *SCOPF* akan disimulasikan dalam program *M-file*. Tahapan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. Studi literatur.

Studi literatur yang dilakukan yaitu berdasarkan jurnal dan buku referensi. Dalam studi literatur akan dipelajari teori pendukung yaitu mengenai *power flow*, *ACOPF*, *SCOPF*, *dynamic line rating* dan penggunaan *Sequential Quadratic Programming* pada *Matlab Matpower* untuk perhitungan *SCOPF*.

2. Pengambilan data.

Data yang dibutuhkan yaitu data generator, data saluran, dan data beban serta data kondisi meteorologi saluran untuk perhitungan *dynamic*

line rating. Data generator terdiri dari data *cost function*, kemampuan pembangkitan maksimum dan minimum generator dan *ramp rate* untuk masing masing generator. Data saluran terdiri dari data impedansi saluran dan kapasitas saluran. Data untuk perhitungan *dynamic line rating* meliputi suhu lingkungan dan kecepatan angin.

3. Pembuatan program *M-file*

Penerapan *SCOPF* menggunakan *Sequential Quadratic Programming* pada *Matlab Matpower* dengan permasalahan dan batasan yang telah disebutkan di atas.

4. Simulasi dan analisis

Simulasi dilakukan dengan 4 kondisi yang berbeda. Kondisi pertama tanpa menyertakan batasan apapun. Kondisi kedua menyertakan batasan kapasitas saluran dan *ramp rate* pembangkit. Kondisi ketiga menyertakan batasan kapasitas saluran, *ramp rate* pembangkit, dan kontingensi. Kondisi keempat menyertakan batasan kapasitas saluran, *ramp rate* pembangkit, kontingensi dan pengaruh *dynamic line rating* terhadap optimasi sistem. Data yang diperoleh dari hasil simulasi di atas kemudian akan digunakan untuk menganalisis keempat kondisi dan untuk mengetahui pengaruh dari batasan batasan yang ada terhadap pembangkitan daya dan biaya total pembangkitan.

5. Penulisan buku

Hasil penelitian yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir dan dikembangkan dalam bentuk jurnal. Laporan ditulis berdasarkan kesimpulan dan hasil analisis permasalahan beserta tahapan yang ada didalamnya.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan penelitian disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut:

Bab 1: PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari penelitian.

Bab 2: ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN *DYNAMIC LINE RATING* MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN SISTEM

Bab ini berisi mengenai dasar teori yang merupakan penjelasan *optimal power flow*, *security constrained optimal power flow* dan *dynamic line rating*.

Bab 3: PENERAPAN *SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING* DALAM ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN *DYNAMIC LINE RATING* MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN SISTEM

Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai penerapan *sequential quadratic programming* dalam permasalahan aliran daya optimal AC dengan beban dinamis.

Bab 4 :SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini berisi hasil simulasi aliran daya optimal dengan *dynamic line rating* mempertimbangkan batas keamanan sistem menggunakan *sequential quadratic programming* serta analisis dari hasil simulasi dengan empat kondisi yang berbeda.

Bab 5: PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil pembahasan masalah dan saran-saran yang berhubungan dengan pokok-pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai berikut:

1. Memberikan manfaat terhadap perkembangan sistem tenaga listrik khususnya pada permasalahan mengenai *security constrained optimal power flow* dengan *dynamic line rating* menggunakan *sequential quadratic programming*.
2. Dapat menambah penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang optimasi pembangkitan tenaga listrik bagi penulis.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil penelitian dengan permasalahan serupa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN DYNAMIC LINE RATING MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN SISTEM

Bab ini berisi mengenai dasar teori yang merupakan penjelasan tentang keamanan sistem tenaga listrik, *optimal power flow* dan *dynamic line rating*. Pada bagian 2.1 akan dijelaskan mengenai gambaran umum sistem tenaga listrik dan kriteria operasi sistem yang baik. Lalu dilanjutkan dengan penjelasan tentang keamanan sistem tenaga yang dibahas di bagian 2.2. Penjelasan *optimal power flow* secara umum dijelaskan pada bagian 2.3. Sedangkan untuk persamaan matematis *optimal power flow* dibahas di bagian 2.4. Persamaan matematis berisi tentang penjelasan fungsi obyektif dan juga batasan dalam permasalahan *optimal power flow*. Selanjutnya bagian 2.5 berisi penjelasan mengenai *dynamic optimal power flow* dengan penambahan batasan *ramprate*. DOPF dengan batas keamanan sistem dijelaskan pada bagian 2.6. Pertimbangan kontingensi ditambahkan pada bagian ini untuk menjaga keamanan sistem. Selanjutnya pada bagian 2.7 menjelaskan mengenai *dynamic line rating* secara singkat. Dan terakhir bagian 2.8 berisi mengenai kajian pustaka terkait *optimal power flow* dan *dynamic line rating*.

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik dibagi menjadi empat bagian utama, yaitu pembangkitan, transmisi, distribusi, dan beban. Pada sisi pembangkitan, pembangkit tenaga listrik membangkitkan energi listrik. Kemudian energi listrik yang dibangkitkan disalurkan melalui jaringan transmisi ke pusat distribusi. Selanjutnya dari pusat distribusi energi listrik disalurkan ke beban melalui jaringan distribusi[6].

Terdapat tiga kriteria yang harus diperhatikan untuk mendapatkan operasi sistem tenaga listrik yang baik. Tiga kriteria tersebut adalah *security* (keamanan), *economy* (ekonomi) dan *quality* (kualitas). *Security* atau keamanan merupakan tingkat keamanan sistem terhadap terjadinya gangguan. Ketika terjadi gangguan di pembangkitan, distribusi maupun transmisi, sedapat mungkin sistem harus bisa mengatasi tanpa mengakibatkan pemadaman pada sisi beban. Sistem akan memenuhi kriteria ekonomi jika sistem dapat beroperasi pada biaya yang minimum

dengan tetap memperhatikan keandalan dan kualitasnya. Kriteria terakhir yang harus dipenuhi sistem adalah *quality*. Kriteria *quality* yaitu kemampuan sistem untuk menyediakan pasokan energi yang baik sesuai dengan batasan operasi seperti tegangan dan frekuensi yang sesuai *standard*.

Dalam pelaksanaan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, prioritas dari ketiga kriteria di atas tergantung pada kondisi *real time*. Saat terjadi gangguan, maka *security* adalah prioritas utama sedangkan mutu dan ekonomi tidak diutamakan. Kemudian pada saat keamanan dan kualitas sudah bagus, maka selanjutnya ekonomi harus diprioritaskan.

2.2 Keamanan Sistem Tenaga

Selain upaya untuk meminimalkan biaya operasi, faktor penting lainnya yang harus diperhatikan dalam operasi sistem tenaga listrik adalah menjaga keamanan system. Prioritas utama dalam operasi sistem tenaga listrik adalah kemampuan untuk mempertahankan keamanan sistem (*system security*). Keamanan sistem yaitu menjaga supaya sistem tetap dapat memenuhi kebutuhan beban saat terjadi gangguan tanpa melanggar batasan operasi seperti kemampuan maksimal generator dan kapasitas saluran[1].

Salah satu permasalahan dalam pengelolaan system yang aman adalah menjaga saluran transmisi supaya tidak ada yang mengalami pembebanan lebih, terutama jika terjadi gangguan pada satu elemen atau lebih. Pembebanan yang berlebihan tersebut akan menyebabkan jatuh tegangan pada elemen yang terganggu bertambah. Akibatnya tegangan pada beberapa bus lainnya dalam sistem juga ikut menurun dan dapat merusak peralatan listrik. *Re-dispatch* pembebanan pembangkit merupakan salah satu cara untuk menjaga keamanan system supaya tidak terjadi *overload* pada saluran transmisi sehingga jatuh tegangan yang berlebihan dapat dihindari[7].

Sistem tenaga harus dioperasikan dengan cara yang aman baik dalam keadaan normal maupun kontingensi. Kontingensi adalah kejadian yang disebabkan oleh kegagalan dari pembangkit atau saluran baik satu unit atau lebih. Untuk menjaga keandalan sistem tenaga listrik maka diperlukan perencanaan yang menggunakan analisis kontingensi[8]. Karena kegagalan yang paling sering terjadi pada kelistrikan adalah saluran transmisi maka analisis kontingensi dilakukan dengan mensimulasikan gangguan pada salah satu saluran atau lebih kemudian dianalisis pengaruhnya terhadap keamanan sistem dan biaya operasinya.

Program yang dapat melakukan pengamanan di bawah keadaan normal dan kontingensi disebut sebagai aliran daya optimal dengan batas keamanan sistem atau *security constrained optimal power flow*.

2.3 Optimal Power Flow

Optimal Power Flow (OPF) merupakan gabungan dari dua study yaitu *power flow* dan *economic dispatch*. *Power flow* mengacu pada persamaan jaringan, generator dan transmisi. Metode *power flow* menemukan solusi matematis namun tidak harus secara fisik layak atau optimal. Persamaan *power flow* sendiri tidak memperhitungkan batasan daya reaktif generator atau batasan saluran transmisi. *Economic dispatch* menggambarkan berbagai formulasi untuk menentukan biaya pembangkitan termurah untuk melayani beban tertentu. Namun formulasi ini menyederhanakan atau terkadang mengabaikan batasan aliran daya. *Optimal power flow* mencari solusi optimal dari fungsi obyektif dengan batasan aliran daya dan batasan operasional lainnya seperti batasan minimum output generator, batasan tegangan dan batasan saluran transmisi.

2.4 Persamaan Matematis Permasalahan Optimal Power Flow Arus Bolak-balik

ACOPF memiliki sekitar dua kali lebih banyak variabel dibanding aliran daya *DCOPF*. Selain itu persamaan jaringan tidak linier dan ini membuat solusi dari *ACOPF* jauh lebih sulit.

Fungsi biaya pembangkit merupakan fungsi obyektif yang umumnya merupakan persamaan orde dua. Direpresentasikan sebagai berikut:

$$F_i(P_i) = a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i \quad (2.1)$$

dimana:

F_i = Besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i (Rp)

P_{gi} = Daya output dari pembangkit ke-i (MW)

a_i, b_i, c_i = koefisien biaya pembangkitan ke-i

Untuk menemukan solusi permasalahan optimasi seperti *OPF* ada dua batasan secara umum yaitu *equality* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* dalam permasalahan *OPF* adalah persamaan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada tiap bus sistem yang harus dicukupi. *Inequality constraint* merupakan batasan pertidaksamaan yang biasanya digunakan untuk batas keamanan sistem. *Inequality constraint*

dalam permasalahan *OPF* adalah batasan pembangkitan daya generator, aliran daya di kapasitas saluran dan *ramp rate* generator.

Equality constraint dalam OPF mempunyai persamaan sebagai berikut :

$$P_i - jQ_i = (P_{gi} - P_{di}) + j(Q_{gi} - Q_{di}) = V_i^* (\sum_{j=1}^n V_j Y_{ij}) \quad (2.2)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.3)$$

sehingga

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.4)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.5)$$

Dimana $i = 1, 2, 3, \dots, n$ menyatakan jumlah bus. P_i dan Q_i menyatakan injeksi daya aktif dan reaktif di bus i . P_{gi} dan Q_{gi} menyatakan daya aktif dan generator di bus i . P_{di} dan Q_{di} menyatakan daya aktif dan reaktif beban di bus i .

Sedangkan persamaan untuk *inequality constraint* dalam permasalahan adalah sebagai berikut :

Batasan pembangkit :

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2.6)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2.7)$$

dimana $P_{gen_i}^{min}$ dan $Q_{gen_i}^{min}$ menyatakan batas minimum generator, ng adalah jumlah generator sedangkan $P_{gen_i}^{max}$ dan $Q_{gen_i}^{max}$ menyatakan batasan maksimum generator.

Batasan tegangan :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (2.8)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (2.9)$$

dimana V_i dan δ_i adalah magnitude dan sudut fasa tegangan pada bus i sedangkan nb adalah jumlah bus. Magnitude dan sudut fasa tidak boleh melebihi batas minimum dan maksimumnya.

Batasan saluran transmisi :

$$S_l \leq S_l^{max} \quad l = 1, 2, \dots, n_{br} \quad (2.10)$$

n_{br} adalah jumlah saluran. Besarnya aliran daya atau arus pada saluran transmisi tidak boleh melebihi batasan kapasitasnya.

2.5 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)

OPF konvensional merupakan bagian penting dalam pengoperasian sistem tenaga dengan biaya yang minimum. Namun dalam beban yang dinamis, opf konvensional tidak mungkin diterapkan dalam operasi nyata karena melanggar batasan *ramp rate* [9]. *Dynamic optimal power flow* adalah pengembangan dari OPF konvensional karena memperhitungkan parameter *ramprate* pembangkit. DOPF digunakan untuk menentukan pembagian pembebanan pembangkit dengan beban yang dinamis. Beban yang dinamis pada penelitian ini adalah beban yang berubah-ubah dalam selang waktu 1 jam.

Fungsi tujuan dari DOPF adalah untuk meminimalkan biaya generator sepanjang jangka waktu tertentu dari beberapa interval waktu dengan tetap memenuhi batasan kapasitas saluran transmisi dan *ramprate* dari masing-masing unit generator [9]. *Ramprate* merupakan *constraint* tambahan yang membedakan OPF konvensional dengan DOPF. *Ramprate* merupakan batasan kenaikan atau penurunan generator pada kondisi sesudah dan sebelumnya dalam waktu tertentu.

Fungsi biaya pembangkitan merupakan fungsi objektif yang dimodelkan dengan persamaan berikut :

$$F_i^t(P_{gi}^t) = a_i(P_{gi}^t)^2 + b_iP_{gi}^t + c_i \quad (2.11)$$

Dengan P_{gi}^t adalah daya keluaran dari generator ke- i pada saat t dan a_i , b_i , c_i merupakan koefisien biaya generator ke- i .

Fungsi obyektif pada permasalahan DOPF adalah :

$$\text{minimize } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N F_i^t(P_{gi}^t) \right) \quad (2.12)$$

Persamaan ini meminimalkan biaya pembangkitan dari semua unit pembangkit selama T interval waktu, dengan T adalah zona waktu diskrit.

Biaya diminimalkan melalui batasan :

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus,

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (2.13)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (2.14)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (2.15)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.16)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad (2.17)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad (2.18)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad (2.19)$$

5. Batasan *ramp rate*

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad (2.20)$$

δ_i merupakan *ramp rate* limit dari generator ke-*i*. Pada penelitian ini *ramp up* dan *ramp down* diasumsikan sama dan mempunyai nilai yang konstan.

2.6 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) dengan batas keamanan sistem

Batasan *ramprate* digunakan untuk menjaga umur dari pembangkit dan peralatan pendukungnya. DOPF dengan batasan *ramprate* dapat digunakan untuk perencanaan dengan beban yang dinamis sesuai kondisi *realtime*. Untuk pengembangan DOPF, batas keamanan berupa kontingensi perlu ditambahkan pada sistem. Kontingensi yang terjadi pada generator atau saluran akan memberikan perubahan pada sistem. Untuk itu dengan penambahan batasan keamanan pada perencanaan sistem memberikan pencegahan agar tidak ada pelanggaran batasan operasi yang ada saat terjadinya gangguan. Dengan mempertimbangkan kontingensi, batasan yang ada dalam permasalahan DOPF menjadi bertambah, sehingga perhitungan optimasi menjadi lebih kompleks.

Batasan-batasan kondisi normal,

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus,

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (2.21)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (2.22)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (2.23)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.24)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad (2.25)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad (2.26)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad (2.27)$$

5. Batasan *ramp rate*

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad (2.28)$$

Batasan – batasan saat kontingensi,

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus,

$$P_i^{kt} = P_{gi}^{kt} - P_{di}^{kt} = \sum_{j=1}^n V_i^{kt} V_j^{kt} (G_{ij} \cos \theta_{ij}^{kt} + B_{ij} \sin \theta_{ij}^{kt}) \quad (2.29)$$

$$Q_i^{kt} = Q_{gi}^{kt} - Q_{di}^{kt} = \sum_{j=1}^n V_i^{kt} V_j^{kt} (G_{ij} \sin \theta_{ij}^{kt} - B_{ij} \cos \theta_{ij}^{kt}) \quad (2.30)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^{kt} \leq P_{gi}^{max} \quad (2.31)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^{kt} \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.32)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^{kt} \leq V_i^{max} \quad (2.33)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^{kt} \leq \theta_i^{max} \quad (2.34)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_i^{kt} \leq S_i^{max} \quad (2.35)$$

5. Batasan ramp rate

$$-\frac{\delta_i}{5} \leq P_{gi}^{kt} - P_{gi}^t \leq \frac{\delta_i}{5} \quad (2.36)$$

Pada batasan kontingensi, terdapat kopling yang besarnya adalah seperlima dari *ramprate* generator. Kopling ini menghubungkan kondisi normal dan kondisi kontingensi. Kopling mempengaruhi proses *re-dispatch* pada saat terjadi kontingensi. Dengan asumsi proses *re-dispatch* adalah 12 menit, didapat kopling antara kondisi normal dan kontingensi adalah seperlima dari *ramprate* generator.

2.7 Dynamic Line Rating dengan Heat Balance Equation

Metode *dynamic line rating* dapat diklasifikasikan dalam tiga hal yaitu : perkiraan *dynamic line rating* dari beban sistem tenaga listrik dan prediksi cuaca, estimasi *dynamic line rating* dari pengukuran tidak langsung dan evaluasi *dynamic line rating* secara *real time* dari data meteorologi terpadu. *Dynamic line rating* dapat digabungkan dalam permasalahan *optimal power flow* dalam skala waktu yang berbeda mulai dari perencanaan sampai dengan pengoperasian sistem tenaga secara *real time*[4].

Konsep *dynamic line rating* telah banyak diusulkan untuk meningkatkan kemampuan jalur transmisi dan dengan cepat mendapatkan aplikasi praktik. *Dynamic line rating* digunakan untuk meningkatkan kemampuan saluran transmisi secara dinamis[10]. Penerapan *dynamic line rating* pada saluran transmisi berpotensi meningkatkan keamanan sistem dengan tingkat ekonomi yang lebih baik jika dibandingkan dengan *static line rating*. Namun karena faktor perhitungan parameter yang sulit untuk diukur secara pasti dan perhitungan secara tepat pada DLR susah untuk didapatkan, metode DLR sulit untuk diterapkan pada aplikasi nyata.

Menurut IEEE Std. 738 [5] suhu konduktor jaringan tergantung pada 1) arus yang mengalir melalui konduktor, 2) ukuran konduktor dan resistansi dan 3) kondisi cuaca sekitar (misalnya suhu, kecepatan dan arah angin, serta radiasi matahari). Berikut ini adalah persamaan *steady-state heat balance* :

$$q_c + q_r = q_s + I^2 R(T_c) \quad (2.37)$$

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}} \quad (2.38)$$

$R(T_c)$ adalah resistansi konduktor saat temperatur T_c (temperatur maksimal konduktor). q_c adalah kehilangan panas konveksi konduktor. Nilai q_c dipengaruhi oleh kecepatan angin dan temperatur lingkungan sekitar. Persamaan untuk q_c ada tiga yaitu untuk kecepatan angin nol, angin rendah dan angin tinggi. Berikut persamaan q_c untuk kecepatan angin nol dan tinggi.

$$q_{cn} = 3,645 \times \rho_f^{0,5} \times D^{0,75} \times ((T_c - T_a)^{1,25} \text{ W/m} \quad (2.39)$$

$$q_c = 0.754 \left(\frac{D \times \rho_f \times V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \times k_f \times K_{angle} (T_c - T_a) \text{ W/m} \quad (2.40)$$

Keterangan:

D = Diameter konduktor

T_c = temperatur konduktor (100 °C)

T_a = temperatur lingkungan

ρ_f = kepadatan udara

V_w = Kecepatan angin

μ_f = kekentalan udara

k_f = konduktivitas termal udara

K_{angle} = faktor arah angin

q_r merupakan kehilangan panas radiasi. Nilai q_r dipengaruhi oleh temperatur lingkungan sekitar. Sedangkan q_s adalah keuntungan panas matahari. Berikut persamaan kerugian q_r dan q_s :

$$q_r = 17,8 \times D \times \varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (2.41)$$

$$q_s = K_s \times D \times Q_s \quad (2.42)$$

Keterangan :

ε	= emisivity (0.23 – 0.91)
K_{solar}	= solar radiation heat gain coefficients
Q_s	= Solar radiation (MW/m^2)

2.8 Optimal Power Flow Mempertimbangkan Dynamic Line Rating

Penelitian mengenai *security constraint optimal power flow* mempertimbangkan kontingensi dilakukan pada 2015 [8]. Pada penelitian ini, menggunakan metode *quadratic programming* dengan *software* matlab. *Ramprate* antara kondisi normal dan kontingensi menggunakan asumsi *ramprate* 1 jam. Pada [7] digunakan metode kontrol preventif dan korektif untuk pengamanan perencanaan sistem. Penyelesaian *dynamic optimal power flow* dengan pembebanan pembangkit selama 24 jam dengan menggunakan sistem IEEE 14 bus dilakukan pada [9]. Sedangkan pada [11] metode *sequential quadratic programming* digabungkan dengan algoritma *differential evolution* untuk menyelesaikan permasalahan *optimal power flow*.

Penelitian [3] menganalisis potensi penggunaan *dynamic line rating* untuk memperoleh rating kapasitas saluran yang lebih besar. Penelitian mengenai integrasi *dynamic line rating* dalam permasalahan AC-OPF dilakukan pada [2]. Selanjutnya, penelitian [4] membahas mengenai *security constraint unit commitment* dengan *dynamic line rating* menggunakan metode dekomposisi Bender untuk penyederhanaan permasalahan yang kompleks.. Penelitian [10] mengintegrasikan *dynamic line rating* dalam permasalahan yang lebih sederhana yaitu *security constraint economic dispatch*. Pada penelitian ini, perhitungan *dynamic line rating* menggunakan metode prakiraan dari jam sebelumnya untuk menentukan rating kapasitas saluran dari jam selanjutnya.

Tugas akhir yang akan dikerjakan adalah mengenai *security constraint optimal power flow* dengan *dynamic line rating*. Batasan *ramprate*, kapasitas saluran dan pertimbangan kontingensi akan diperhitungkan untuk memperoleh perencanaan sistem yang aman. Integrasi *dynamic line rating* dalam permasalahan SCOPF akan dilakukan, sehingga akan didapatkan rating saluran yang lebih besar dan biaya pembangkitan yang lebih murah.

BAB 3

PENERAPAN SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN SISTEM DENGAN RATING SALURAN DINAMIS

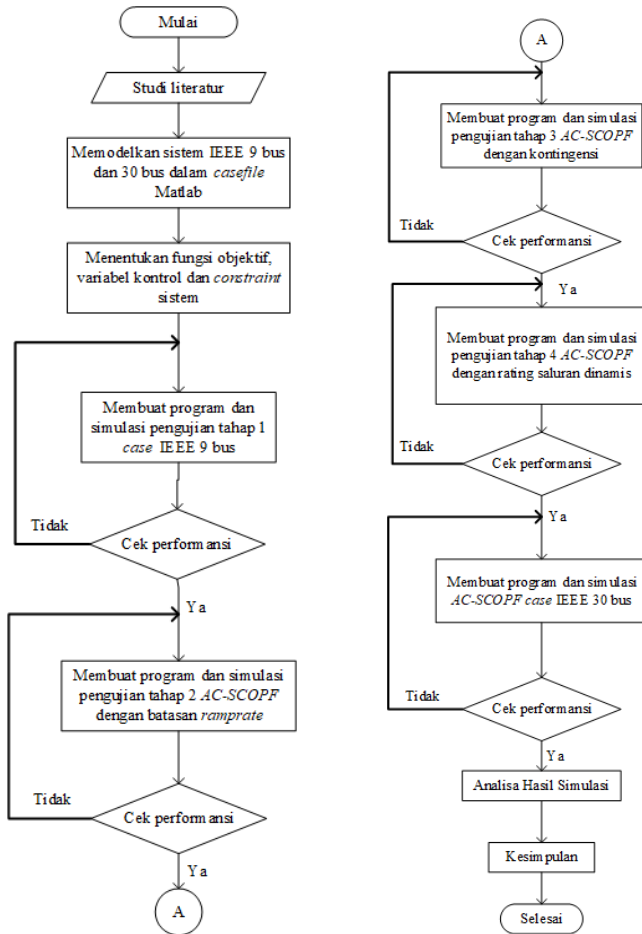
Bab ini berisi tentang penerapan *sequential quadratic programming* pada permasalahan AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis. Dimulai dari bagian 3.1 yang menjelaskan mengenai algoritma urutan kerja penelitian. Lalu bagian 3.2 menjelaskan mengenai *sequential quadratic programming* pada matlab yang menggunakan fungsi *fmincon*. Selanjutnya terakhir yaitu bagian 3.3 yang dibagi lagi menjadi tiga bagian. Bagian 3.2.1 menjelaskan inisialisasi permasalahan, bagian 3.2.2 berisi mengenai pembentukan matriks – matriks dalam permasalahan AC-DOPF dan bagian 3.2.3 berisi tentang perhitungan faktor pengali untuk *dynamic line rating*.

3.1 Algoritma

Penelitian ini menggunakan *sequential quadratic programming* untuk menyelesaikan permasalahan *security constraint optimal power flow* dengan rating saluran dinamis pada suatu sistem kelistrikan. Pengolahan data dan simulasi dilakukan menggunakan program *matpower* yang dimodifikasi pada *software* matlab. Dengan alur penyelesaian penelitian sesuai dengan gambar 3.1.

Pengerjaan tugas akhir dimulai ini dengan studi literatur mengenai sistem kelistrikan, aliran daya optimal, keamanan sistem, dan optimasi menggunakan *sequential quadratic programming* untuk permasalahan ACOPF. Pemodelan menggunakan case *M-file* IEEE 9 bus dan 30 bus yang dimodifikasi. Setelah itu menentukan fungsi objektif, *constraint* yang meliputi *equality constraint* dan *inequality constraint* serta variabel kontrol dari permasalahan SCOPF. Pembuatan program AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis dilakukan dengan empat tahap pengujian.

Tahap pertama yaitu tahap pengujian *sequential quadratic programming* AC-SCOPF dengan ACOPF secara individual. Pengujian menggunakan dua profil beban dan dilakukan dengan mengecek variabel kontrol sistem yang meliputi magnitudo dan sudut tegangan tegangan serta daya pembangkitan tanpa adanya batasan *ramprate*. Program valid jika nilai variabel kontrol antara AC-SCOPF dengan ACOPF telah sama.



Gambar 3.1 Flowchart alur sistem

Tahap kedua yaitu pengujian AC-SCOPF dengan batasan *ramprate*. Pengujian dilakukan dengan mengecek kenaikan maupun penurunan daya pembangkitan masing-masing generator setiap satu jam. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi antara AC-SCOPF tanpa *ramprate* dengan AC-SCOPF dengan batasan *ramprate*.

Tahap ketiga yaitu AC-SCOPF dengan kontigensi. Pengujian dilakukan dengan mengecek kenaikan maupun penurunan daya pembangkitan antara kondisi normal dengan kondisi kontingensi serta aliran daya pada saluran sesuai dengan kapasitasnya.

Tahap keempat yaitu AC-SCOPF dengan rating saluran yang dinamis. Pengujian dilakukan dengan membandingkan biaya keseluruhan sistem antara AC-SCOPF biasa dengan AC-SCOPF menggunakan rating saluran yang dinamis. Setelah semua tahapan pengujian dengan sistem IEEE 9 bus dilakukan, maka terakhir dilanjutkan dengan pengujian IEEE 30 bus. Hasil keluaran program pada sistem 30 bus kemudian dianalisa. Setelah dilakukan analisa kemudian didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini.

3.2 Sequential Quadratic Programming pada Matlab

Sequential quadratic programming merupakan salah satu metode optimasi *non-linear*. Metode SQP dianggap sebagai metode pemrograman *non-linear* terbaik untuk permasalahan optimasi. SQP lebih unggul dengan metode optimasi *non-linear* lainnya dalam hal efisiensi, akurasi dan prosentase solusi sukses selama sejumlah test permasalahan[11].

Pada matlab terdapat fungsi *fmincon* yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi *non-linear* dengan metode *sequential quadratic programming*. Matpower adalah salah satu *M-files* yang telah dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan OPF. Pada matpower terdapat fungsi *fmincon* yang bisa digunakan untuk perhitungan ACOPF.

Berikut adalah argumen input dari *fmincon* :

- **Fun** : fungsi yang diminimalkan dan merupakan fungsi yang menampung vektor x dan mengembalikan skalar f , fungsi tujuan dievaluasi pada vektor x . **Fun** adalah fungsi handle dari sebuah file.
- **x0** : Vektor yang menyatakan initial point dari vektor x .
- **Aeq** : Matriks yang menyatakan koefisien linier dari *equality constraint*.
- **beq** : Vektor yang menyatakan vektor konstan dari *equality constraint* dimana $Aeq \cdot x = beq$.
- **Aineq** : Matriks yang menyatakan koefisien non linear dari *inequality constraint*.

- `bineq` : Vektor yang menyatakan vektor konstan dari inequality constraint, dimana $A_{ineq} * x \leq bineq$.
- `Lb` : vektor yang menyatakan batas nilai bawah dari persamaan $lb \leq x \leq ub$.
- `Ub` : vektor yang menyatakan batas nilai atas dari persamaan $lb \leq x \leq ub$.

Perintah yang dapat digunakan untuk melakukan pemanggilan program dengan argumen input dalam `fmincon_matpower` adalah sebagai berikut :

- `x = fmincon (fun,x0,A,b)`
Meminimalkan fungsi `x` dimulai dengan nilai awal `x0` yang diuraikan dalam fungsi `fun` sesuai dengan *inequality constraint* linear $A * x \leq b$, dengan `x0` bisa berupa skalar, vector atau matrix.
- `x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq)`
Meminimalkan subjek `fun` sesuai dengan persamaan linear $Aeq * x = beq$ dan $A * x \leq b$. Jika tidak ada *inequality constraint*, maka `A = []` dan `B = []`.
- `x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub)`
Medefinisikan batas bawah dan batas atas dalam menentukan variabel `x`, sehingga solusinya akan selalu dalam batasan $lb \leq x \leq ub$. Jika tidak ada *equality constraint*, maka `Aeq = []` dan `beq = []`, dan jika batas bawah `x` tidak ada maka `lb = -inf` dan jika batas atas `x` tidak ada maka `ub = inf`.
- `x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)`
Meminimalkan subject sesuai *inequality constraint non-linear* `c(x)` atau *equality constraint* `CEQ (x)` yang didefinisikan dalam `nonlcon`. `fmincon` mengoptimalkan subject dengan memenuhi $c(x) \leq 0$ dan $CEQ(x) = 0$. Jika tidak ada batas nilai untuk `x` maka `lb=[]` dan `ub = []`.
- `x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)`
Meminimalkan subject dengan pilihan optimasi yang ditentukan dalam `options`. Jika tidak ada *equality dan inequality constraint non-linear* maka `nonlcon = []`.
- `x = fmincon (problem)`
Untuk menemukan nilai minimum dari `problem`, dimana `problem` adalah struktur yang dijelaskan dalam input argument.

- $[x, fval] = \text{fmincon} (...)$
Mengembalikan nilai fungsi obyektif fun pada solusi x.
- $[x, fval, \text{exitflag}] = \text{fmincon} (...)$
Mengembalikan nilai *exitflag* yang mendeskripsikan kondisi keluaran fmincon.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}] = \text{fmincon} (...)$
Mengembalikan struktur keluaran dengan informasi tentang optimasi.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}] = \text{fmincon} (...)$
Mengembalikan struktur lambda dengan pengali Lagrange yang berisi solusi x.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}] = \text{fmincon} (...)$
Mengembalikan nilai *gradient* fungsi fun sebagai solusi x.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}, \text{hessian}] = \text{fmincon} (...)$
Mengembalikan nilai hessian sebagai solusi x.

3.3 Penerapan Sequential Quadratic Programming pada Aliran Daya Optimal dengan Batas Keamanan Sistem

Penerapan *sequential quadratic programming* diawali dengan inisialisasi permasalahan AC-DOPF kedalam program. Inisialisasi terdiri dari dua komponen utama yaitu fungsi objektif dan batasan masalah yang terdiri dari *equality* dan *inequality constraint*.

3.3.1 Inisialisasi Permasalahan DOPF

1. Fungsi obojektif :

$$\text{minimize } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{ng} F_i^t (P_{gi}^t) \right) \quad (3.1)$$

$$F_i(P_i) = a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i \quad (3.2)$$

Keterangan:

$F_i^t(P_{gi}^t)$ = Besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i pada waktu ke-t

P_{gi}^t = Daya output dari pembangkit ke-i pada waktu ke-t

T = jumlah rentang waktu beban

ng = jumlah generator

a_i, b_i, c_i = koefisien biaya pembangkitan ke-i

2. Equality constraint

- Active Power Balance

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (3.3)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (3.4)$$

dimana $i = 1, 2, 3, \dots, n$ menyatakan jumlah bus. P_i^t dan Q_i^t menyatakan injeksi daya aktif dan reaktif di bus i pada waktu ke- t . P_{di}^t dan Q_{di}^t menyatakan daya aktif dan reaktif beban di bus i pada waktu ke- t .

3. Inequality constraint

- Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (3.5)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad (3.6)$$

- Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad (3.7)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad (3.8)$$

- Batasan aliran daya saluran

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad (3.9)$$

- Batasan ramp rate

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad (3.10)$$

Variabel yang dioptimasi disebut dengan variabel kontrol. Pada permasalahan ACOPF, variabel kontrol berupa magnitude dan sudut tegangan serta daya aktif dan reaktif pembangkitan generator. Jika n_b adalah jumlah bus, n_g adalah jumlah generator, maka jumlah variabel adalah n , dimana $n = 2n_b + 2n_g$. Contoh jika $n_b = 3$, $n_g = 2$, maka ukuran matriks variabel kontrol atau x adalah $[10, 1]$. Sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ P_{g1} \\ P_{g2} \\ Q_{g1} \\ Q_{g2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.3.2 AC-DOPF Pada Sequential Quadratic Programming

3.3.2.1 Inisialisasi x_0 sebagai nilai awal

Fungsi *fmincon* membutuhkan input argumen x_0 sebagai nilai awal, dimana ukuran x_0 sama dengan ukuran matriks x . Untuk level beban = t maka ukuran matriks x_0 adalah $[(2nb+2ng)*2, 1]$. Misal untuk sistem dengan $nb = 3$, $ng = 2$ dan level beban = t , maka matriks x_0 adalah sebagai berikut :

$$x_0 = \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ \theta_{31} \\ v_{11} \\ v_{21} \\ v_{31} \\ P_{g11} \\ P_{g21} \\ Q_{g11} \\ Q_{g21} \\ \vdots \\ \theta_{1t} \\ \theta_{2t} \\ \theta_{3t} \\ v_{1t} \\ v_{2t} \\ v_{3t} \\ P_{g1t} \\ P_{g2t} \\ Q_{g1t} \\ Q_{g2t} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3.2.2 Pembentukan f dan df yang merupakan fungsi objektif

f merupakan nilai total biaya pembangkitan sedangkan df adalah turunan dari fungsi f . Nilai f dijumlahkan untuk setiap level beban, dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$f = \sum_{i=1}^{jam} f_i \quad (3.12)$$

Untuk sistem dengan 3 bus (nb=3) dan 3 generator (ng=2) maka ukuran matriks df sama dengan matriks x . Matriks df dapat dituliskan sebagai berikut :

$$df = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{df}{p_{g1}} \\ \frac{df}{p_{g2}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Sedangkan dengan level beban = t, maka ukuran matriks df adalah $[(2nb+2ng)*t,1]$, sehingga matriks df menjadi :

$$df = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{df}{p_{g1\ 1}} \\ \frac{df}{p_{g2\ 1}} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{df}{p_{g1\ t}} \\ \frac{df}{p_{g2\ 1}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

3.3.2.3 Pembentukan Equality Constraint berupa Matrik geq dan $dgeq$

Dalam permasalahan ACOPF *equality constraint* berupa matriks geq dan $dgeq$. Dua matriks tersebut merupakan *power balance* dari sistem. Untuk sistem dengan 3 bus ($nb=3$), 2 generator ($ng=2$) dan 2 beban yang terletak di bus 1 dan 3, maka matriks awal dari geq adalah sebagai berikut:

$$geq = \begin{bmatrix} P_{d1} \\ 0 \\ P_{d2} \\ Q_{d1} \\ 0 \\ Q_{d2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Untuk level beban = t , ukuran matriks geq menjadi $[2nb*t, 1]$, sehingga matriks geq menjadi:

$$geq = \begin{bmatrix} P_{d1\ 1} \\ 0 \\ P_{d2\ 1} \\ Q_{d1\ 1} \\ 0 \\ Q_{d2\ 1} \\ \vdots \\ P_{d1\ t} \\ 0 \\ P_{d2\ t} \\ Q_{d1\ t} \\ 0 \\ Q_{d2\ t} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Sedangkan $dgeq$ adalah turunan dari matriks geq , ukuran matriks $dgeq$ adalah $[(2nb+2ng)*2, 2nb*2]$. Pada matriks $dgeq$ setiap bagian diturunkan terhadap bagian tersebut, sehingga bagian yang lain menjadi nol. Misal dengan b = jumlah bus dan m = jumlah generator, maka matriks $dgeq$ dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{array}{c}
\text{Aktif power balance} \quad \text{reaktif power balance} \\
d_{geq} = \begin{bmatrix}
\frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} & \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{geq}{d\theta_{b1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{bb}} & \frac{geq}{d\theta_{b1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{bb}} \\
\frac{geq}{dv_{11}} & \dots & \frac{geq}{dv_{1b}} & \frac{geq}{dv_{11}} & \dots & \frac{geq}{dv_{1b}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{geq}{dv_{b1}} & \dots & \frac{geq}{dv_{bb}} & \frac{geq}{dv_{b1}} & \dots & \frac{geq}{dv_{bb}} \\
\frac{geq}{dP_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dP_{g1}} & \frac{geq}{dP_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dP_{g1}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{geq}{dP_{gm}} & \dots & \frac{geq}{dP_{gm}} & \frac{geq}{dP_{gm}} & \dots & \frac{geq}{dP_{gm}} \\
\frac{geq}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{g1}} & \frac{geq}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{g1}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{geq}{dQ_m} & \dots & \frac{geq}{dQ_m} & \frac{geq}{dQ_m} & \dots & \frac{geq}{dQ_m}
\end{bmatrix}
\end{array} \quad (3.17)$$

Untuk level beban = t maka matriks d_{geq} disusun dibawah secara diagonal. Sehingga ukuran matriks d_{geq} menjadi $[(2nb+2ng)*t : 2nb*t]$, berikut merupakan matriks d_{geq} dengan periode lebih dari satu jam :

$$d_{geq} = \begin{bmatrix}
d_{geq_1} & \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} \\
\text{zeros} & d_{geq_2} & \text{zeros} & \text{zeros} \\
\text{zeros} & \text{zeros} & \ddots & \text{zeros} \\
\text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} & d_{geq_t}
\end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.3.2.4 Pembentukan Inequality Constraint berupa matriks g, dg dan Af

Dalam permasalahan ACOPF *inequality constraint* berupa matriks g dan dg . Dua matriks tersebut merupakan batasan aliran daya dengan from bus dan to bus limit. Misal untuk sistem dengan 3 bus, 2 generator dan 3 saluran (nbr=3), maka ukuran awal dari matriks g adalah :

$$g = \begin{bmatrix} Sf_1 \\ Sf_2 \\ Sf_3 \\ St_1 \\ St_2 \\ St_3 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Dengan Sf adalah aliran daya from bus dan St adalah aliran daya to bus. Untuk level beban = t, maka matriks g menjadi :

$$g = \begin{bmatrix} Sf_{1\ 1} \\ Sf_{2\ 1} \\ Sf_{3\ 1} \\ St_{1\ 1} \\ St_{2\ 1} \\ St_{3\ 1} \\ \vdots \\ Sf_{1\ t} \\ Sf_{2\ t} \\ Sf_{3\ t} \\ St_{1\ t} \\ St_{2\ t} \\ St_{3\ t} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Sedangkan matriks dg adalah turunan dari g, misal dengan b = jumlah bus, m = jumlah generator dan br = jumlah saluran maka matriks dg sebagai berikut :

$$\begin{array}{cc}
\text{from bus flow} & \text{to bus flow} \\
dg = \begin{bmatrix} \frac{g}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{1br}} & \frac{g}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{1br}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{d\theta_{b1}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{bbr}} & \frac{g}{d\theta_{b1}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{bbr}} \\ \frac{g}{dv_{11}} & \cdots & \frac{g}{dv_{1br}} & \frac{g}{dv_{11}} & \cdots & \frac{g}{dv_{1br}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{dv_{b1}} & \cdots & \frac{g}{dv_{bbr}} & \frac{g}{dv_{b1}} & \cdots & \frac{g}{dv_{bbr}} \\ \frac{g}{dP_{g1}} & \cdots & \frac{g}{dP_{g1}} & \frac{g}{dP_{g1}} & \cdots & \frac{g}{dP_{g1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{dP_{gm}} & \cdots & \frac{g}{dP_{gm}} & \frac{g}{dP_{gm}} & \cdots & \frac{g}{dP_{gm}} \\ \frac{g}{dQ_{g1}} & \cdots & \frac{g}{dQ_{g1}} & \frac{g}{dQ_{g1}} & \cdots & \frac{g}{dQ_{g1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{dQ_m} & \cdots & \frac{g}{dQ_m} & \frac{g}{dQ_m} & \cdots & \frac{g}{dQ_m} \end{bmatrix} & (3.21)
\end{array}$$

Untuk level beban = t maka matriks dg disusun dibawah secara diagonal. Sehingga ukuran matriks dg menjadi $[(2nb+2ng)*t : 2nbr*t]$, berikut merupakan matriks dg dengan periode lebih dari satu jam :

$$dg = \begin{bmatrix} dg_1 & \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} \\ \text{zeros} & dg_2 & \text{zeros} & \text{zeros} \\ \text{zeros} & \text{zeros} & \ddots & \text{zeros} \\ \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} & dg_t \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Sedangkan pembentukan matriks yang menyatakan *ramp rate* masuk dalam matrik Af dan bf dimana $Af*x \leq bf$. Batasan *ramp rate* dimasukkan dalam matriks bf sedangkan matriks untuk *ramp rate* dimasukkan dalam matriks Af . Misal untuk sistem dengan jumlah bus = 3, generator = 2 dan level beban = 2, maka matriks untuk kondisi normal ke kondisi normal selanjutnya sebagai berikut :

$$Af = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$bf = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Sedangkan ramprate kontingensi adalah 0,2 dari *ramp rate* generator karena waktu dispatch saat kontingensi terlalu lama jika satu jam, sehingga dibuat 12 menit atau 0,2 jam. Matriks untuk kondisi normal ke kondisi kontingensi adalah sebagai berikut :

$$Af = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

3.3.2.5 Pembentukan vektor lb dan ub

Vektor lb dan ub merupakan batas atas dan bawah dari variabel kontrol (x). Pada DOPF variabel kontrol yang dioptimasi terdiri dari sudut tegangan, magnitude tegangan, daya aktif dan daya reaktif. Sehingga vektor lb dan ub berisi batas atas dan bawah dari variabel tersebut.

$$\begin{bmatrix} \theta_{1min}^t \\ \theta_{2min}^t \\ \theta_{3min}^t \\ v_{1min}^t \\ v_{2min}^t \\ v_{3min}^t \\ P_{g1min}^t \\ P_{g2min}^t \\ Q_{g1min}^t \\ Q_{g2min}^t \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_1^t \\ \theta_2^t \\ \theta_3^t \\ v_1^t \\ v_2^t \\ v_3^t \\ P_{g1}^t \\ P_{g2}^t \\ Q_{g1}^t \\ Q_{g2}^t \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_{1max}^t \\ \theta_{2max}^t \\ \theta_{3max}^t \\ v_{1max}^t \\ v_{2max}^t \\ v_{3max}^t \\ P_{g1max}^t \\ P_{g2max}^t \\ Q_{g1max}^t \\ Q_{g2max}^t \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Untuk level beban = t, maka matriks lb dan ub menjadi :

$$\text{lb} = \begin{bmatrix} \theta_{1min}^1 \\ \theta_{2min}^1 \\ \theta_{3min}^1 \\ v_{1min}^1 \\ v_{2min}^1 \\ v_{3min}^1 \\ P_{g1min}^1 \\ P_{g2min}^1 \\ Q_{g1min}^1 \\ Q_{g2min}^1 \\ \vdots \\ \theta_{1min}^t \\ \theta_{2min}^t \\ \theta_{3min}^t \\ v_{1min}^t \\ v_{2min}^t \\ v_{3min}^t \\ P_{g1min}^t \\ P_{g2min}^t \\ Q_{g1min}^t \\ Q_{g2min}^t \end{bmatrix} \quad \text{ub} = \begin{bmatrix} \theta_{1max}^1 \\ \theta_{2max}^1 \\ \theta_{3max}^1 \\ v_{1max}^1 \\ v_{2max}^1 \\ v_{3max}^1 \\ P_{g1max}^1 \\ P_{g2max}^1 \\ Q_{g1max}^1 \\ Q_{g2max}^1 \\ \vdots \\ \theta_{1max}^t \\ \theta_{2max}^t \\ \theta_{3max}^t \\ v_{1max}^t \\ v_{2max}^t \\ v_{3max}^t \\ P_{g1max}^t \\ P_{g2max}^t \\ Q_{g1max}^t \\ Q_{g2max}^t \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

3.3.3 Dynamic Line Rating

Karena rumus untuk *dynamic line rating* terlalu kompleks, maka perlu untuk disederhanakan sehingga bisa diaplikasikan dalam perhitungan DOPF. Terdapat dua variabel yang mempengaruhi nilai dari *dynamic line rating* yaitu suhu lingkungan (T_a) dan kecepatan angin (V_w). Dimana tingkat kehilangan panas konveksi konduktor dipengaruhi oleh suhu lingkungan dan kecepatan angin sedangkan tingkat kehilangan panas radiasi dipengaruhi oleh kecepatan angin saja. Untuk nilai q_c (tingkat penambahan panas matahari) diasumsikan dengan nilai tetap sesuai dengan data meteorologi pada referensi [5].

- Penyederhanaan rumus untuk q_c

$$q_c = \left[0.754 \left(\frac{D \times \rho_f \times V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \times k_f \times K_{angle} (T_c - T_a) \right] \quad (3.28)$$

$$q_c = \left[0.754 \left(\frac{D \times \rho_f}{\mu_f} \right)^{0.6} \times k_f \times K_{angle} \times (T_c - T_a) \times V_w^{0.6} \right] \quad (3.29)$$

Dengan A_c = koefisien konveksi dan $T_c = 100^\circ\text{C}$

$$A_c = 0.754 \left(\frac{D \times \rho_f}{\mu_f} \right)^{0.6} \times k_f \times K_{angle} \quad (3.30)$$

Sehingga,

$$q_c = A_c (100 - T_a) \times V_w^{0.6} \quad (3.31)$$

- Penyederhanaan rumus untuk q_r

$$q_r = 17,8 \times D \times \varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (3.32)$$

$$q_r = 17,8 \times D \times \varepsilon \times \left(\frac{1}{100} \right)^4 [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (3.33)$$

$$\text{Dengan, } A_r = 17,8 \times D \times \varepsilon \times \left(\frac{1}{100} \right)^4 \quad (3.34)$$

$$\text{Maka, } q_r = A_r \times [(373)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (3.35)$$

- Penyederhanaan rumus I secara keseluruhan

$$I_{max}(\bar{T}) = \sqrt{\frac{q_c(\bar{T}) + q_r(\bar{T}) - q_s}{R(\bar{T})}} \quad (3.36)$$

$$I = \sqrt{\frac{A_c (100 - T_a) \cdot V_w^{0.6} + A_r \cdot [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R(T_c)}} \quad (3.37)$$

Untuk kondisi statis, $V_w = 0 \text{ m/s}$ dan $T_a = 40^\circ\text{C}$

$$I = \sqrt{\frac{q_{cn} + A_r \cdot [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R(T_c)}} \quad (3.38)$$

- Menentukan nilai A_c dan A_r
Berdasarkan perhitungan referensi [5] didapatkan data sebagai berikut :

$$q_c = 77,06 \text{ W/m untuk } V_w = 0,61 \text{ m/s dan } T_a = 40^\circ\text{C}$$

$$q_{cn} = 42,4 \text{ W/m untuk } V_w = 0 \text{ m/s dan } T_a = 40^\circ\text{C}$$

$$q_r = 39,1 \text{ W/m untuk } T_a = 40^\circ\text{C}$$

$$q_s = 22,44 \text{ W/m (konstan)}$$

Dari data tersebut maka bisa ditentukan nilai

$$\begin{aligned} q_c &= A_c (100 - T_a) \cdot V_w^{0.6} \\ 77,06 &= A_c \times 60 \times 0,61^{0.6} \\ A_c &= 1,728 \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} q_r &= A_r \cdot [(373)^4 - (T_a + 273)^4] \\ 39,1 &= A_r \cdot [(373)^4 - (313)^4] \\ A_r &= 4,007 \times 10^{-9} \end{aligned} \quad (3.40)$$

- Menentukan faktor pengali antara I dinamis dan I statis

I statis untuk $V_w = 0 \text{ m/s dan } T_a = 40^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} I_s &= \sqrt{\frac{q_{cn} + A_r \cdot [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R(T_c)}} \\ I_s &= \sqrt{\frac{42,4 + 4,007 \times 10^{-9} \times [(373)^4 - (313)^4] - 22,44}{R(T_c)}} \\ I_s &= \sqrt{\frac{103,944}{R(T_c)}} \end{aligned} \quad (3.41)$$

Sedangkan untuk I dinamis adalah sebagai berikut,

$$I_d = \sqrt{\frac{A_c (100 - T_a) \cdot V_w^{0.6} + A_r \cdot [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R(T_c)}}$$

$$I_d = \sqrt{\frac{1,728 (100-T_a) \cdot Vw^{0.6} + 4,007 \times 10^{-9} [(373)^4 - (T_a+273)^4] - 22,44}{R(T_c)}}$$

Sehingga didapatkan rumus untuk faktor pengali

$$F_{kalirate} = \frac{I_d}{I_s} \quad (3.40)$$

$$= \frac{\sqrt{\frac{1,728 (100-T_a) \cdot Vw^{0.6} + 4,007 \times 10^{-9} [(373)^4 - (T_a+273)^4] - 22,44}{R(T_c)}}}{\sqrt{\frac{103,944}{R(T_c)}}}$$

$$= \sqrt{\frac{1,728 (100-T_a) \cdot Vw^{0.6} + 4,007 \times 10^{-9} [(373)^4 - (T_a+273)^4] - 22,44}{103,944}} \quad (3.41)$$

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini berisi tentang hasil simulasi dan analisis penelitian. Pertama yaitu analisis kontingensi yang dijelaskan di bagian 4.1. Analisis kontingensi dilakukan pada sistem 9 bus dan 30 bus. Selanjutnya bagian 4.2 yang berisi mengenai simulasi sistem 9 bus yang dibagi dalam 4 tahap pengujian sesuai dengan urutan kerja penelitian yang dijelaskan di bab 3. Lalu terakhir yaitu pengujian sistem 30 bus dengan analisis membandingkan perbedaan penggunaan *static line rating* dan *dynamic line rating*.

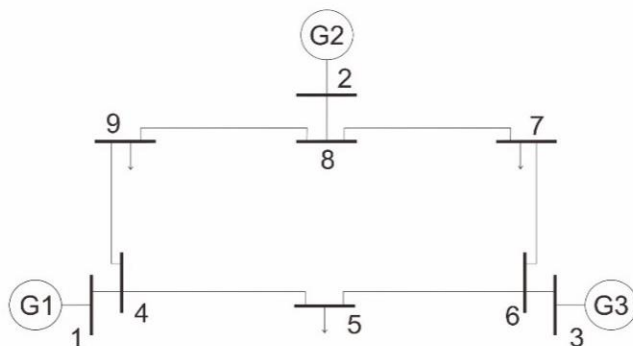
4.1 Analisis Kontingensi

Analisis kontingensi merupakan komponen penting dalam permasalahan aliran daya optimal dengan batas keamanan sistem. Analisis kontingensi dilakukan pada setiap saluran sistem. Saluran yang memiliki dampak terbesar nantinya akan diketahui dengan melakukan analisis kontingensi. Analisis kontingensi dilakukan dengan mengetahui dampak kontingensi terhadap total biaya pembangkitan. Biaya pembangkitan yang besar menandakan bahwa saluran memberikan efek yang besar terhadap sistem.

4.1.1 Analisis Kontingensi Sistem 9 bus

Analisis kontingensi menghasilkan daftar urutan dari saluran yang memiliki dampak terbesar hingga yang terkecil ketika saluran tersebut mengalami kontingensi.

Sistem 9 bus IEEE mempunyai 3 pembangkit, 3 laod bus dan 9 saluran. *Single line diagram* sistem 9 bus IEEE dapat dilihat pada gambar 4.1. Daftar urutan hasil analisis kontingensi sistem 9 bus IEEE ditunjukkan oleh tabel 4.1. Berdasarkan tabel 4.1 terlihat bahwa saluran no.7 yaitu saluran dari bus 8 ke bus 2 adalah saluran yang menghasilkan dampak terbesar bila terjadi kontingensi karena memiliki biaya pembangkitan paling besar. Hasil biaya pembangkitan dalam tabel merupakan hasil running program sesuai *case* 9 bus tanpa modifikasi dengan total beban 315 MW.



Gambar 4.1 Sistem IEEE 9 Bus

Tabel 4.1 Daftar Dampak Kontingensi sistem 9 bus IEEE

Urutan	No	Bus	Ke Bus	Biaya (\$)
1	7	8	2	5310
2	9	9	4	5297
3	1	1	4	5297
4	4	3	6	5297
5	3	5	6	5297
6	2	4	5	5297
7	5	6	7	5297
8	6	7	8	5297
9	8	8	9	5297

4.1.2 Analisis Kontingensi Sistem 30 bus

Sistem 30 bus IEEE memiliki 41 saluran. Karena jumlah saluran yang terlalu banyak, maka hanya ditampilkan 10 saluran yang memiliki dampak terbesar. Hasil analisis kontingensi sistem 30 bus IEEE ditunjukkan oleh tabel 4.2.

Tabel 4.2 Daftar Dampak Kontingensi Sistem 30 bus IEEE

Urutan	No	Bus	Ke Bus	Biaya (\$)
1	10	6	8	<i>Not Convergen</i>
2	29	21	22	716.11
3	35	25	27	660.89
4	30	15	23	577.87
5	34	25	26	576.9
6	6	2	6	576.9
7	2	1	3	576.9
8	7	4	6	576.9
9	8	5	7	576.9
10	3	2	4	576.9

Berdasarkan tabel 4.2 terlihat bahwa saluran no.10 yaitu saluran dari bus 6 ke bus 8 adalah saluran yang menghasilkan dampak terbesar bila terjadi kontingensi karena sistem menjadi *not convergen*. Sedangkan saluran no.29 adalah saluran dengan dampak terbesar kedua karena memiliki biaya pembangkitan paling besar.

4.2 Simulasi Sistem 9 Bus IEEE

Pengujian dilakukan pada program aliran daya optimal dinamis mempertimbangkan batas keamanan sistem yang selanjutnya disebut dengan AC-SCOPF, diuji terlebih dahulu dengan software yang sudah ada di matpower yang selanjutnya disebut ACOPF Matpower. Pengujian ini dilakukan dengan empat tahap, yaitu :

1. Pengujian tanpa batasan
2. Pengujian batasan *ramprate*
3. Pengujian dengan kontingensi
4. Pengujian dengan kontingensi dan rating saluran dinamis

Pengujian dilakukan dengan sistem modifikasi IEEE 9 bus dengan data sesuai tabel 4.3, tabel 4.4 dan tabel 4.5 yang merupakan data pembangkit, saluran dan beban. Modifikasi dilakukan dengan menaikkan sedikit nilai beban dari IEEE 9 bus tanpa modifikasi.

Tabel 4.3 Data Pembangkit Sistem Modifikasi IEEE 9 bus

Unit	<i>Cost Function</i>	P max (MW)	P min (MW)	Ramp Rate (MW/Jam)
1	$0.11P_1^2 + 5P_1 + 150$	250	10	30
2	$0.085P_2^2 + 1.2P_2 + 600$	300	10	40
3	$0.1225P_3^2 + P_3 + 335$	270	10	35

Tabel 4.4 Data Saluran Sistem Modifikasi IEEE 9 bus

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
1	1	4	0.0576	250
2	4	5	0.092	250
3	5	6	0.17	150
4	3	6	0.0586	300
5	6	7	0.1008	150
6	7	8	0.072	250
7	8	2	0.0625	250
8	8	9	0.161	250
9	9	4	0.085	250

Tabel 4.5 Data Beban Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus

Bus	Beban (MW)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	110
6	0
7	120
8	0
9	145

4.2.1 Pengujian Tahap 1

Pengujian ini dimaksudkan untuk membandingkan apakah hasil simulasi sistem 9 bus IEEE menggunakan SCOPF dengan *sequential*

quadratic programming memiliki hasil yang sesuai dengan ACOPF Matpower secara individual. Pengujian dilakukan dengan 2 level beban yang berbeda. Data 2 level beban tersebut ditunjukkan oleh tabel 4.6.

4.2.1.1 Simulasi Pengujian Tahap 1

Perbandingan hasil simulasi validasi AC-SCOPF dengan ACOPF Matpower dapat dilihat di tabel 4.7, dimana variabel output terdiri dari sudut tegangan, magnitudo tegangan, daya aktif dan reaktif pembangkitan serta total biaya pembangkitan.

4.2.1.2 Analisa Pengujian Tahap 1

Berdasarkan hasil simulasi pada sistem 9 bus menggunakan ACOPF dan AC-SCOPF *sequential quadratic programming* dapat dilihat bahwa sudut bus, tegangan bus, daya aktif dan reaktif keluaran masing-masing unit generator dan total biaya pembangkitan menunjukkan nilai yang sama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *sequential quadratic programming* dapat digunakan untuk perhitungan *optimal power flow* arus bolak - balik dengan akurat.

Tabel 4.6 Data 2 Level Beban Untuk Pengujian Tahap 1

Jam ke-	Beban (MW)			Total (MW)
	Bus 5	Bus 7	Bus 9	
1	110	120	145	375
2	132	144	174	450

Tabel 4.7 Hasil sudut bus, daya aktif dan reaktif keluaran generator dan biaya pembangkitan pada simulasi tahap 1

Variabel output	ACOPF		SCOPF	
	Jam 1	Jam 2	Jam 1	Jam 2
01	0	0	0	0
02	0.0964	0.1109	0.0964	0.1109
03	0.0614	0.0669	0.0614	0.0669
04	-0.0526	-0.0653	-0.0526	-0.0653
05	-0.0873	-0.1086	-0.0873	-0.1086
06	0.0069	0.0025	0.0069	0.0025
07	-0.0303	-0.0419	-0.0303	-0.0419
08	0.0144	0.0125	0.0144	0.0125
09	-0.0972	-0.1212	-0.0972	-0.1212
V1	1.100	1.100	1.100	1.100
V2	1.099	1.100	1.099	1.100
V3	1.088	1.097	1.088	1.097
V4	1.092	1.084	1.092	1.084
V5	1.088	1.067	1.088	1.067
V6	1.100	1.100	1.100	1.100
V7	1.088	1.080	1.088	1.080
V8	1.100	1.094	1.100	1.094
V9	1.067	1.050	1.067	1.050
P1	109.76	135.14	109.76	135.14
P2	158.65	189.07	158.65	189.07
P3	111.17	132.47	111.17	132.47
Q1	17.92	35.68	17.92	35.68
Q2	6.25	20.38	6.25	20.38
Q3	-18.78	-1.70	-18.78	-1.70
Total Daya (MW)	375	450	375	450
Total Biaya(\$)	16230.97		16230.97	

4.2.2 Pengujian Tahap 2

Pengujian tahap 2 yaitu pengujian dengan batasan *ramp rate* yang merupakan penghubung antara kondisi jam t ke jam $t+1$. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan total biaya pembangkitan sistem tanpa

batasan ramprate dan dengan batasan *ramp rate*. Serta untuk mengetahui apakah program AC-SCOPF dengan batasan *ramp rate* menghasilkan perhitungan daya keluaran dari masing-masing unit pembangkit tanpa melewati batasan ramprate. Pengujian pada tahap ini menggunakan profil beban sesuai dengan tabel 4.8.

4.2.2.1 Simulasi Pengujian Tahap 2

Hasil simulasi AC-SCOPF tanpa batasan *ramp rate* dan AC-SCOPF dengan batasan *ramp rate* untuk sistem 9 bus IEEE dapat dilihat pada tabel 4.9, 4.10 dan 4.11 sebagai berikut.

Tabel 4.8 Profil beban pengujian tahap 2

Jam ke-	1	2	3	4	5	6
Total Beban	375	450	525	562.5	487.5	412.5

Tabel 4.9 Biaya total pembangkitan

Menggunakan batasan <i>ramp rate</i>	Biaya total pembangkitan (\$)
Tidak	61196.13
Ya	61434.78

Tabel 4.10 Daya pembangkitan tanpa batasan ramprate

Pembangkit	Daya (MW) pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
Unit 1	109.76	135.14	182.14	206.75	157.26	122.40
Unit 2	158.65	189.07	198.78	202.73	195.20	173.86
Unit 3	117.17	132.47	152.51	162.67	142.56	121.81

Tabel 4.11 Daya pembangkitan dengan batasan *ramp rate*

Pembangkit	Daya (MW) pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
Unit 1	118.62	148.62	178.62	202.25	172.25	142.25
Unit 2	153.26	189.83	194.21	196.81	183.77	161.78
Unit 3	107.42	126.73	160.87	173.47	138.47	113.40

Tabel 4.12 Perubahan daya pembangkitan tanpa batasan *ramp rate*

Pembangkit	Ramp rate	Perubahan daya antara jam				
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
Unit 1	30	25.38	47.00	24.61	-49.49	-34.86
Unit 2	40	30.42	9.71	3.95	-7.53	-21.34
Unit 3	35	15.30	20.04	10.16	-20.11	-20.75

Tabel 4.13 Perubahan daya pembangkitan dengan batasan *ramp rate*

Pembangkit	Ramp rate	Perubahan daya antara jam				
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
Unit 1	30	30.00	30.00	23.63	-30.00	-30.00
Unit 2	40	36.57	4.38	2.60	-13.04	-21.99
Unit 3	35	19.31	34.14	12.60	-35.00	-25.07

4.2.2.2 Analisis Pengujian Tahap 2

Berdasarkan tabel 4.9 dapat dilihat bahwa biaya pembangkitan tanpa batasan *ramprate* menghasilkan nilai yang lebih murah. Namun terjadi pelanggaran batasan *ramp rate* pada unit 1 tepatnya perubahan daya antara jam 2-3 dan jam 4-5 yang dapat dilihat sesuai tabel 4.12.

Penggunaan batasan *ramp rate* menghasilkan biaya yang lebih mahal namun sistem menjadi aman karena tidak ada pelanggaran batasan *ramprate*. Pada tabel 4.13 terlihat bahwa perubahan daya dari unit 1 tidak ada yang melebihi 30 MW ataupun kurang dari -30 MW.

4.2.3 Pengujian Tahap 3

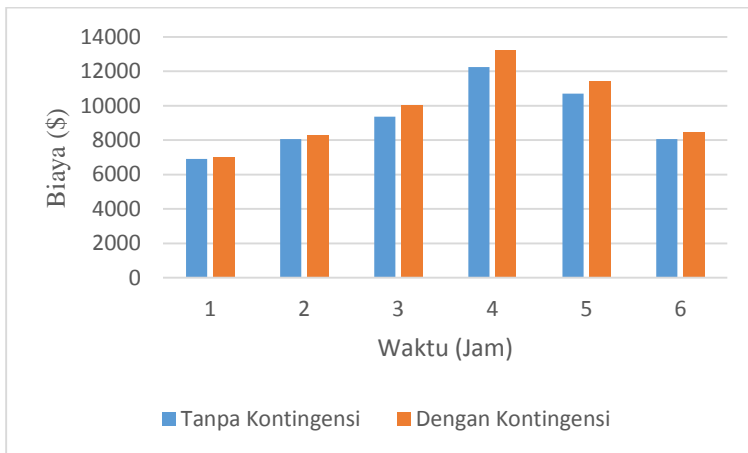
Pengujian tahap 3 adalah pengujian AC-SCOPF dengan kontingensi. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah saat terjadi kontingensi program AC-SCOPF menghasilkan perhitungan daya keluaran dari masing - masing unit pembangkit tanpa melewati batasan *ramprate* antara kondisi normal dan kontingensi serta batasan saluran. Pengujian juga bertujuan untuk membandingkan total biaya pembangkitan kondisi normal dan kontingensi. Kontingensi hanya dilakukan pada satu saluran yaitu saluran dari bus 8 ke 2. Pengujian pada tahap ini menggunakan profil beban sesuai dengan tabel 4.14.

4.2.3.1 Simulasi Pengujian Tahap 3

Hasil simulasi AC-SCOPF dengan kontingensi untuk sistem 9 bus IEEE dapat dilihat pada gambar 4.2, tabel 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 dan 4.20.

Tabel 4.14 Profil beban pengujian tahap 3

Jam ke-	1	2	3	4	5	6
Total Beban	375	412.5	450	525	487.5	412.5



Gambar 4.2 Biaya Pembangkitan Per Jam

Tabel 4.15 Biaya total pembangkitan

Kondisi	Biaya total pembangkitan (\$)
Normal tanpa kontingensi	55343.09
Normal dengan kontingensi	58476.12
Kontingensi	59247.05

Tabel 4.16 Daya pembangkitan kondisi normal

Pembangkit	Daya (MW) pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
Unit 1	123.11	143.70	173.70	203.70	182.83	152.83
Unit 2	132.93	132.93	120.48	132.92	132.93	120.77
Unit 3	123.13	140.80	161.47	196.47	178.65	143.65

Tabel 4.17 Daya pembangkitan kondisi kontingensi

Pembangkit	Daya (MW) pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
Unit 1	127.26	147.82	168.49	209.70	188.83	147.82
Unit 2	124..93	124.93	124.93	124.92	124.93	124.93
Unit 3	126.89	144.62	162.40	198.68	180.71	144.62

Tabel 4.18 Perubahan daya pembangkitan

	Ramp rate	Perubahan daya kondisi normal dan kontingensi					
		1	2	3	4	5	6
Unit 1	6.00	4.15	4.12	-5.21	6.00	6.00	-5.01
Unit 2	8.00	-8.00	-8.00	4.45	-8.00	-8.00	4.16
Unit 3	7.00	3.76	3.82	0.93	2.21	2.06	0.97

Tabel 4.19 Aliran daya saluran pada jam ke-4 kondisi normal

From Bus	To Bus	Kapasitas Saluran (MVA)	From Bus Injection	
			P (MW)	Q (MVar)
1	4	250	203.70	59.34
4	5	250	72.47	5.77
5	6	150	-82.34	-22.74
3	6	300	196.47	18.83
6	7	150	111.74	8.05
7	8	250	-57.54	-27.34
8	2	250	-132.92	-18.77
8	9	250	75.11	6.42
9	4	250	-129.59	-37.69

Tabel 4.20 Aliran daya saluran pada jam ke-4 kondisi kontingensi

From Bus	To Bus	Kapasitas Saluran (MVA)	From Bus Injection	
			P (MW)	Q (MVar)
1	4	250	209.70	75.25
4	5	250	73.52	6.75
5	6	150	-81.32	-22.26
3	6	300	198.68	36.51
6	7	150	114.98	24.71
7	8	250	-54.49	-13.07
8	2	125	-124.92	4.41
8	9	250	70.20	-3.09
9	4	250	-134.28	-47.83

4.2.3.2 Analisa Pengujian Tahap 3

Hasil simulasi pada tabel 4.15 menunjukkan total biaya pembangkitan kondisi kontingensi lebih mahal jika dibandingkan dengan kondisi normal. Hal itu dikarenakan pada saat kontingensi aspek ekonomi tidak diperhitungkan, prioritas utama adalah keamanan sistem. Dari tabel tersebut dan juga gambar 4.2 terlihat bahwa biaya sistem dengan mempertimbangkan kontingensi mempunyai nilai yang lebih besar, dikarenakan penyesuaian pembangkitan untuk memastikan *re-dispatch* agar tidak melanggar batasan *ramp rate* antara kondisi normal dengan kontingensi dan batasan kapasitas saluran. Pada tabel 4.19 dan 4.20 terlihat bahwa pada kondisi normal maupun kontingensi sistem dalam keadaan aman karena tidak melewati batasan kapasitas saluran, kendati kapasitas saluran bus 8 ke bus 2 menjadi lebih kecil, aliran daya pada saluran tidak melebihi 125 MVA. Padahal dalam operasi tanpa memperhitungkan kontingensi aliran daya pada saluran bus 8 ke bus 2 biasanya lebih dari 125 MVA. Berdasarkan tabel 4.18, dapat dilihat bahwa perubahan daya pembangkitan antara kondisi normal dan kondisi kontingensi tidak melewati batasan *ramp rate* pembangkit. Dari hal tersebut maka dapat disimpulkan bahwa program yang dibuat mampu untuk melakukan perhitungan AC-SCOPF dengan batas keamanan sistem.

4.2.4 Pengujian Tahap 4

Pengujian tahap 4 yaitu pengujian AC-SCOPF dengan batasan saluran dinamis. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan hasil perhitungan antara AC-SCOPF dengan rating saluran statis dan AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis. Rating statis dihitung berdasarkan kondisi cuaca terburuk yaitu saat kecepatan angin rendah dan suhu lingkungan tinggi. Pada pengujian ini, untuk kondisi statis menggunakan kondisi cuaca dengan kecepatan angin = 0 m/s dan suhu lingkungan 40°C. Kecepatan angin = 0 m/s dipilih karena merupakan kondisi terburuk dan sering terjadi. Sedangkan untuk suhu lingkungan 40°C dipilih menyesuaikan sumber referensi [5] dan juga karena merupakan kondisi suhu yang tinggi. Sementara rating saluran dinamis menggunakan kondisi cuaca yang berubah-ubah sesuai yang ditunjukkan tabel 4.21. Dengan kecepatan angin dipilih nilai yang lebih besar dari kondisi statis sedangkan suhu lingkungan dipilih nilai yang lebih kecil dibandingkan kondisi statis.

4.2.4.1 Simulasi Pengujian Tahap 4

Hasil simulasi AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis untuk sistem 9 bus IEEE dapat dilihat pada tabel 4.22, tabel 4.23, gambar 4.3 gambar 4.4 dan gambar 4.5.

Tabel 4.21 Perhitungan rating saluran dinamis pada saluran bus 1 ke bus 4 dari case IEEE 9 bus

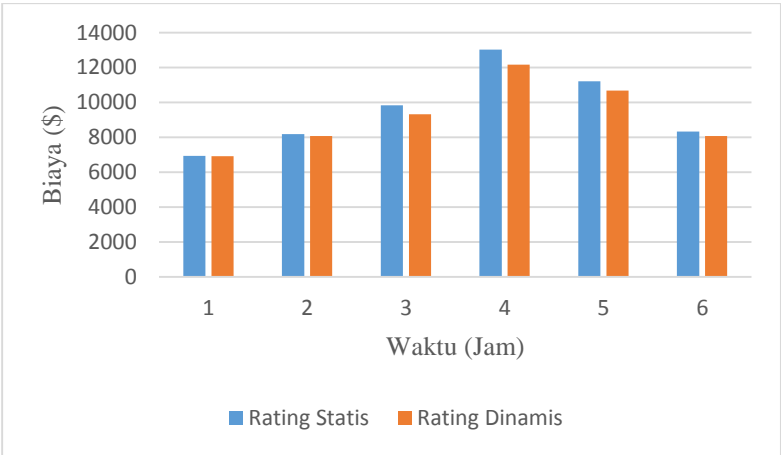
Jam ke-	Vw (m/s)	Ta (°C)	qc (W/m)	qr (W/m)	fkalirate	Is (A)	Id (A)
1	1,0	35	112,32	41,50	1,1243	418,3698	470,360
2	1,5	32	149,87	42,89	1,2801	418,3698	535,534
3	2,0	30	183,34	43,79	1,4033	418,3698	587,095
4	2,5	28	215,6	44,67	1,5126	418,3698	632,836
5	2,1	31	186,09	43,34	1,4112	418,3698	590,386
6	1,3	36	129,45	41,03	1,1934	418,3698	499,285

Tabel 4.22 Total biaya pembangkitan AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis.

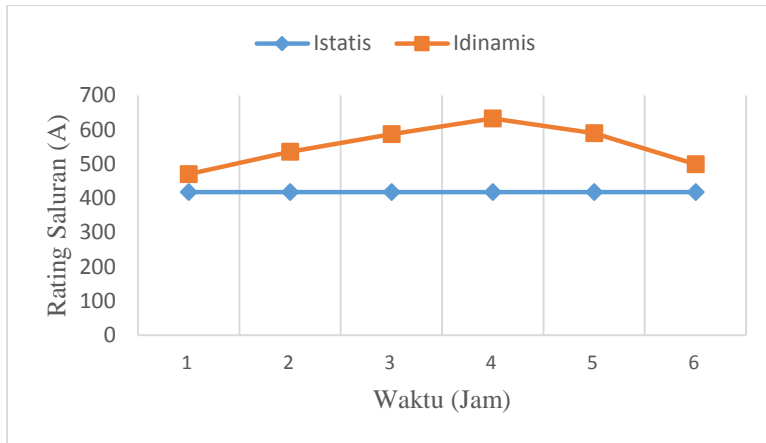
Rating Saluran	Biaya Pembangkitan (\$)
Statis	57503.9272
Dinamis	55196.9942

Tabel 4.23 Kapasitas saluran transmisi

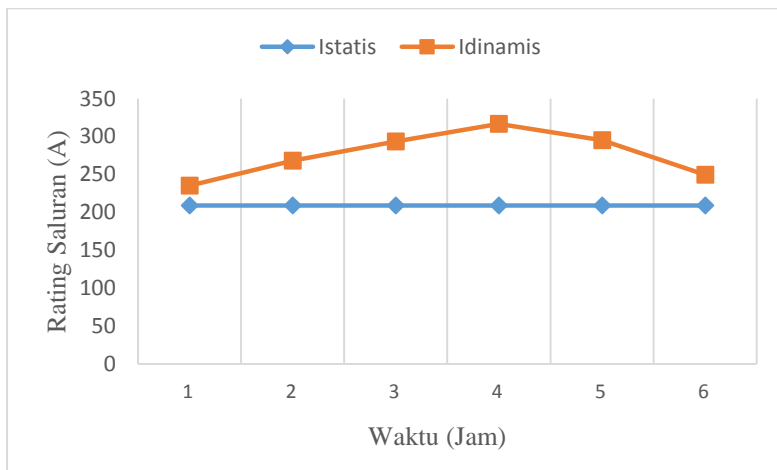
Statis	Rating saluran dinamis (A) jam ke-					
Jam 1-6	1	2	3	4	5	6
418.4	470.4	535.6	587.1	632.8	590.4	493.3
418.4	470.4	535.6	587.1	632.8	590.4	493.3
251.0	282.2	321.3	352.3	379.7	354.2	299.6
502.0	564.4	642.7	704.5	759.4	708.5	599.1
251.0	282.2	321.3	352.3	379.7	354.2	299.6
418.4	470.4	535.6	587.1	632.8	590.4	499.3
418.4	470.4	535.6	587.1	632.8	590.4	499.3
418.4	470.4	535.6	587.1	632.8	590.4	499.3
418.4	470.4	535.6	587.1	632.8	590.4	499.3



Gambar 4.3 Biaya Pembangkitan Pengujian Tahap 4



Gambar 4.4 Kapasitas Saluran bus1 ke 4, Statis dan Dinamis



Gambar 4.5 Kapasitas Saluran bus 8 ke 2, Statis dan Dinamis

4.2.4.2 Analisa Pengujian Tahap 4

Rating saluran dinamis dihitung dengan kondisi cuaca yang berubah-ubah. Kecepatan angin yang semakin tinggi membuat rating saluran semakin besar sedangkan suhu lingkungan yang semakin tinggi

membuat rating saluran menjadi semakin kecil. Pada tabel 4.21 dapat dilihat bahwa rating saluran dinamis mempunyai nilai yang lebih besar dibandingkan dengan rating saluran statis. Rating saluran yang lebih besar membuat saluran transmisi lebih bisa dimanfaatkan. Sehingga biaya perhitungan AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis menghasilkan biaya lebih murah sesuai dengan tabel 4.22 dan gambar 4.3.

4.3 Pengujian Sistem 30 Bus

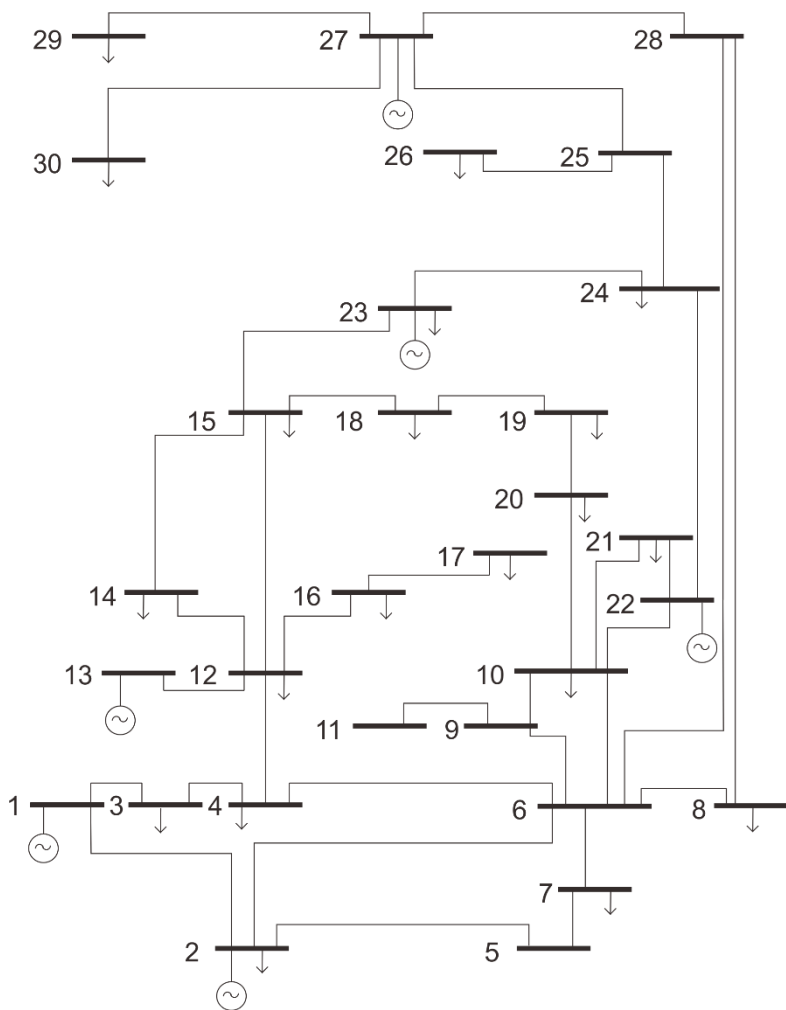
Sistem 30 bus terdiri dari enam pembangkit termal dan 20 load bus. *Single line diagram* sistem 30 bus IEEE dapat dilihat pada gambar 4.6. Hasil perhitungan antara AC-SCOPF dengan rating saluran statis dan AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis akan dibandingkan pada pengujian sistem 30 bus. Untuk kondisi statis menggunakan kondisi cuaca dengan kecepatan angin = 0 m/s dan suhu lingkungan 40°C. Sementara rating saluran dinamis menggunakan kondisi cuaca yang berubah-ubah sesuai yang ditunjukkan tabel 4.24. Pengujian pada sistem 30 bus menggunakan profil beban sesuai dengan tabel 4.25.

Tabel 4.24 Perhitungan rating saluran dinamis pada saluran bus 1 ke bus 2 dari *case* 30 bus

Jam ke-	Vw (m/s)	Ta (°C)	qc (W/m)	qr (W/m)	fkalirate	Is (A)	Id (A)
1	1,0	35	112,32	41,50	1,1243	555,967	625,057
2	1,5	32	149,87	42,89	1,2801	555,967	711,666
3	2,0	30	183,34	43,79	1,4033	555,967	780,184
4	2,5	28	215,60	44,67	1,5126	555,967	840,969
5	2,1	31	186,09	43,34	1,4112	555,967	784,558
6	1,3	36	129,45	41,03	1,1934	555,967	663,495

Tabel 4.25 Profil beban pengujian sistem 30 bus

Jam ke-	1	2	3	4	5	6
Total Beban	188.2	208.1	227.0	264.9	246.0	208.1



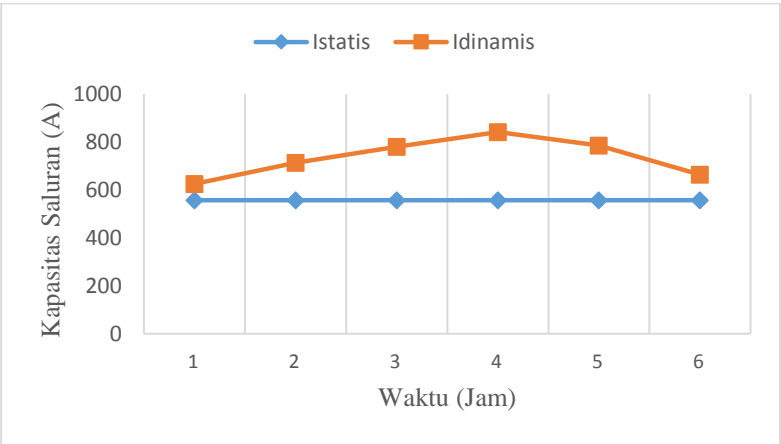
Gambar 4.6 Sistem IEEE 30 Bus

4.3.1 Hasil Simulasi Sistem 30 Bus

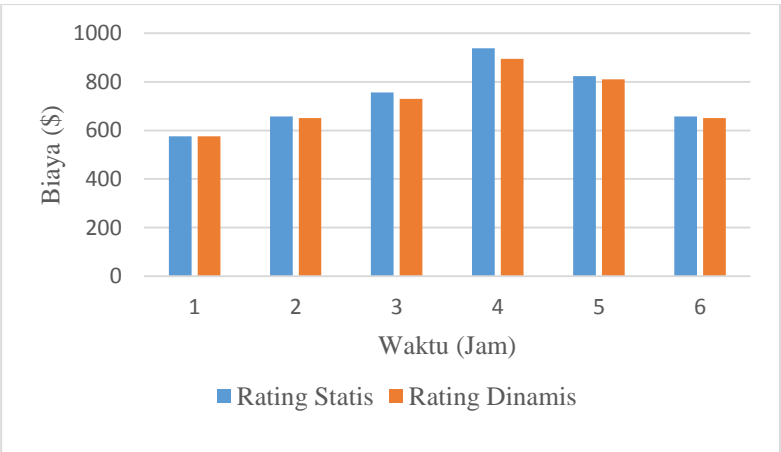
Hasil simulasi AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis untuk sistem 30 bus IEEE dapat dilihat pada tabel 4.26, gambar 4.7 dan gambar 4.8.

Tabel 4.26 Total biaya pembangkitan AC-DOPF sistem 30 bus

Menggunakan batasan <i>ramp rate</i>	Biaya Pembangkitan (\$)	
	Statis	Dinamis
Tidak	4357.9894	4315.5369
Ya	4415.1913	4315.6328



Gambar 4.7 Kapasitas saluran bus 1 ke bus 2 case 30 bus



Gambar 4.8 Biaya Pembangkitan Sistem 30 Bus

4.3.2 Analisa Simulasi Sistem 30 Bus

Berdasarkan tabel 4.26 dan gambar 4.7 dapat dilihat bahwa total biaya pembangkitan dengan dengan rating saluran dinamis lebih murah dibandingkan dengan perhitungan dengan rating saluran statis. Biaya rating saluran dinamis lebih murah pada saat sistem menggunakan batasan *ramp rate* maupun tidak. Hal ini sama dengan pengujian tahap 4 pada sistem 9 bus. Dikarenakan penggunaan rating saluran dinamis membuat nilai kapasitas saluran lebih besar dibandingkan dengan rating saluran statis sehingga biaya total operasi menjadi lebih murah.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisa maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. AC-DOPF menghasilkan biaya pembangkitan yang lebih mahal hingga 0,6% dibandingkan dengan OPF konvensional namun sistem lebih aman karena tidak melanggar batasan *ramp rate*.
2. Dengan mempertimbangkan kontingensi, total biaya pembangkitan pada AC-SCOPF menjadi lebih mahal hingga 5% dibandingkan perhitungan OPF tanpa kontingensi, namun sistem tidak melanggar batasan *ramp rate* antara kondisi normal dan kontingensi serta tidak melanggar batasan kapasitas saluran saat kontingensi sehingga sistem menjadi lebih aman.
3. Rating saluran dinamis pada waktu tertentu mempunyai kapasitas saluran yang lebih besar dibandingkan dengan rating saluran statis karena dihitung sesuai dengan perubahan keadaan lingkungan. Peningkatan kapasitas terbesar terjadi pada jam ke-4, karena dalam keadaan suhu lingkungan terkecil dan kecepatan angin terbesar. Peningkatan kapasitas saluran pada jam ke-4 mencapai 51% dibandingkan dengan rating saluran statis.
4. Dengan menggunakan rating saluran dinamis, biaya total pembangkitan menjadi lebih murah. Untuk sistem IEEE 9 bus biaya total pembangkitan menjadi lebih murah hingga 4%, sedangkan untuk sistem IEEE 30 bus menjadi lebih murah hingga 1,5%.

5.2 Saran

Saran untuk perbaikan dan pengembangan penelitian selanjutnya berdasarkan hasil simulasi dan analisa penelitian ini, yaitu :

1. Mengembangkan AC-SCOPF menjadi *unit commitment* sehingga semakin mendekati keadaan *real* sistem.
2. Menggunakan tingkat penambahan panas akibat matahari yang dinamis sesuai waktu dan kondisi geografis.
3. Menggunakan rating saluran dinamis sesuai data pengukuran pada kondisi lingkungan Indonesia.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wood, Allen J, “Power Generation, Operation, and Control”, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [2] M. Nick, O. Alizadeh-Mousavi, R. Cherkaoui, M. Paolone, “Integration of Transmission Lines Dynamic Thermal Rating into Real-Time Optimal Dispatching of Power Systems”, IEEE, 2015.
- [3] Matthias A. Bucher, Göran Andersson, “Robust Corrective Control Measures in Power Systems With Dynamic Line Rating”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol.31, No.3, May 2016.
- [4] M. Nick, O. Alizadeh-Mousavi, R. Cherkaoui, M. Paolone, “Security Constrained Unit Commitment With Dynamic Thermal Line Rating”, IEEE Transaction on Power System Vol. 31, No. 3, 2016.
- [5] IEEE Std. 738-2012—IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, 2013.
- [6] Saadat, Hadi, “Power System Analysis”, McGraw-Hill, 1999.
- [7] T. P. Rony Seto, “Security Constrained Optimal Power Flow Incorporating Preventive and Corrective Control,” in Electrical Power, Electronics, Communications, Control and Informatics Seminar (EECCIS), 2014.
- [8] R. M. Rony Seto Wibowo, “Quadratic Programming Approach for Security Constrained Optimal Power Flow”, in International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2015.
- [9] Nursidi, Rony Seto Wibowo “Dynamic DC Optimal Power Flow Using Quadratic Programming”, in International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2013.
- [10] Haicheng Zhang, Mingtian Du, Quangang Zhao, Li Xue, “Security Constrained Economic Dispatch with Dynamic Thermal Rating Technology Integration”, International Conference on Power and Renewable Energy, 2016.
- [11] S. Sivasubramani, K.S. Swarup “Sequential quadratic programming based differential evolution algorithm for optimal power flow problem”, IET Generation, Transmission & Distribution, 2011.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

1. Daya keluaran pembangkit AC-SCOPF rating saluran statis sistem 30 bus.

Unit	Daya Keluaran (MW) Pada Jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
P1	44.20	56.02	68.00	80.00	68.01	56.02
P2	57.20	59.43	68.01	80.00	69.88	57.91
P13	21.97	39.13	13.25	40.00	48.25	19.87
P22	23.84	27.97	46.99	15.10	33.99	40.25
P23	13.70	7.73	1.73	1.81	7.83	9.45
P27	31.80	21.23	33.98	55.00	23.10	27.97

2. Daya keluaran pembangkit AC-SCOPF rating saluran statis sistem 30 bus.

Unit	Daya Keluaran (MW) Pada Jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
P1	42.00	48.32	49.33	56.53	55.35	45.40
P2	57.83	61.74	65.12	74.59	68.72	61.42
P13	18.40	39.34	24.80	29.01	49.19	24.14
P22	22.46	18.73	47.06	28.01	25.85	41.23
P23	16.52	18.61	21.74	27.49	25.35	19.49
P27	34.74	24.85	23.10	54.99	26.36	19.85

3. Aliran daya saluran 1 sampai 23 sistem 30 bus dengan rating saluran statis pada jam ke-5.

Branch	From Bus	To Bus	Kapasitas (A)	From Bus Injection		
				P(MW)	Q(Mvar)	I (A)
1	1	2	556.0	44.06	-1.46	179.6
2	1	3	556.0	35.75	11.41	152.9
3	2	4	278.0	32.11	10.36	138.5
4	3	4	556.0	31.68	8.34	138.42
5	2	5	556.0	23.47	8.57	102.59
6	2	6	278.0	37.72	13.85	164.97
7	4	6	384.9	32.41	16.69	155.04
8	5	7	299.4	23.21	9.74	106.29
9	6	7	556.0	8.86	4.21	42.14
10	6	8	256.6	34.26	32.17	201.82
11	6	9	278.0	18.35	3.78	80.46
12	6	10	136.9	10.48	2.16	45.95
13	9	11	278.0	0.03	0.02	0.14
14	9	10	278.0	18.31	3.06	80.29
15	4	12	278.0	19.99	-7.28	90.46
16	12	13	278.0	-39.74	-40.30	235.98
17	12	14	136.9	9.98	3.93	44.71
18	12	15	136.9	22.03	7.44	96.95
19	12	16	136.9	12.05	9.41	63.75
20	14	15	68.4	1.20	0.08	5.11
21	16	17	128.3	6.98	6.50	40.89
22	15	18	68.4	10.96	11.83	68.87
23	18	19	136.9	6.22	7.24	42.38

4. Aliran daya saluran 24 sampai 41 sistem 30 bus dengan rating saluran statis pada jam ke-5.

Branch	From Bus	To Bus	Kapasitas (A)	From Bus Injection		
				P(MW)	Q(Mvar)	I (A)
24	19	20	171.1	-7.01	-5.91	41.3
25	10	20	136.9	10.33	9.18	60.0
26	10	17	136.9	5.60	5.83	35.2
27	10	21	136.9	5.05	-9.68	47.4
28	10	22	136.9	-0.28	-8.02	34.8
29	21	22	136.9	-19.16	-25.40	136.3
30	15	23	68.4	0.59	-9.57	40.9
31	22	24	68.4	-4.24	0.09	18.17
32	23	24	68.4	-2.06	7.58	32.92
33	24	25	128.3	-19.14	-1.63	81.91
34	25	26	128.3	4.93	4.76	28.02
35	25	27	128.3	-24.75	-7.50	105.82
36	28	27	278.0	-10.69	-20.93	100.12
37	27	29	68.4	8.71	5.37	40.21
38	27	30	68.4	10.06	6.72	47.56
39	29	30	68.4	5.18	3.78	26.11
40	8	28	192.5	-7.77	-10.51	57.05
41	6	28	136.9	-2.82	-12.83	56.42

5. Aliran daya saluran 1 sampai 23 sistem 30 bus dengan rating saluran dinamis pada jam ke-5.

Branch	From Bus	To Bus	Kapasitas (A)	From Bus Injection		
				P(MW)	Q(Mvar)	I (A)
1	1	2	841.0	29.86	-4.81	123.20
2	1	3	841.0	26.66	8.67	114.21
3	2	4	420.5	24.94	9.25	108.74
4	3	4	841.0	22.93	6.62	100.05
5	2	5	841.0	19.72	7.89	86.82
6	2	6	420.5	29.26	12.52	130.11
7	4	6	582.2	25.00	16.11	125.93
8	5	7	452.8	19.50	9.37	90.70
9	6	7	841.0	12.71	4.57	57.35
10	6	8	388.1	33.19	33.27	199.60
11	6	9	420.5	9.78	-0.18	41.54
12	6	10	207.0	5.59	-0.11	23.73
13	9	11	420.5	-0.00	0.00	0.00
14	9	10	420.5	9.77	-0.38	41.53
15	4	12	420.5	11.78	-8.69	61.65
16	12	13	420.5	-29.01	41.33	207.99
17	12	14	207.0	6.69	4.53	33.28
18	12	15	207.0	9.00	7.94	49.42
19	12	16	207.0	9.43	8.43	52.08
20	14	15	103.5	-2.06	0.73	9.19
21	16	17	194.1	4.39	5.61	30.06
22	15	18	103.5	11.73	11.36	68.30
23	18	19	207.0	6.97	6.74	42.06

6. Aliran daya saluran 24 sampai 41 sistem 30 bus dengan rating saluran dinamis pada jam ke-5.

Branch	From Bus	To Bus	Kapasitas (A)	From Bus Injection		
				P(MW)	Q(Mvar)	I (A)
24	19	20	258.8	-6.39	-6.55	40.25
25	10	20	207.0	9.66	9.80	58.41
26	10	17	207.0	8.28	6.89	45.72
27	10	21	207.0	-4.59	-14.00	62.50
28	10	22	207.0	-6.10	-10.46	51.39
29	21	22	207.0	-29.16	-29.83	175.08
30	15	23	103.5	-16.37	-7.77	75.79
31	22	24	103.5	-7.53	4.50	36.50
32	23	24	103.5	6.32	6.73	37.47
33	24	25	194.1	-13.57	1.55	56.77
34	25	26	194.1	5.01	4.79	28.22
35	25	27	194.1	-18.91	-3.82	78.57
36	28	27	420.5	-16.80	-15.83	97.43
37	27	29	103.5	8.77	5.45	40.97
38	27	30	103.5	10.13	6.80	26.55
39	29	30	103.5	5.21	3.80	26.55
40	8	28	291.1	-9.03	-9.60	56.92
41	6	28	207.0	-7.65	-8.86	49.72

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Nurdin Sugiantoro lahir di Nganjuk pada tanggal 10 Desember 1994. Merupakan anak ke-7 dari 7 bersaudara pasangan Paimin dan Sumini. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Jatirejo 1 Nganjuk pada tahun 2000-2007. Penulis kemudian melanjutkan sekolah di SMPN 1 Nganjuk pada tahun 2007-2010 dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 2 Nganjuk pada tahun 2010-2013. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Teknik Elektro. Bidang studi yang penulis ambil yaitu Teknik Sistem Tenaga. Penulis aktif dalam beberapa kegiatan sosial diantaranya yaitu sebagai sekretaris Paguyuban Mahasiswa Argabayu Nganjuk yang mempunyai banyak agenda sosial pada tahun 2014-2015. Selain itu penulis juga aktif dalam kegiatan dakwah agama islam. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: nurdin.ngk@gmail.com